



TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI DC-DC FORWARD
KONVERTER SEBAGAI *AUXILIARY SUPPLY* SEPEDA
MOTOR LISTRIK**

Mohammad Rizky Ferdiansyah

NRP 07111440000123

Dosen Pembimbing

Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

Fakultas Teknologi Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018

---Halaman ini sengaja dikosongkan---



FINAL PROJECT - EE 184801

**DESIGN AND IMPLEMENTATION DC- DC FORWARD
CONVERTER AS ELECTRIC MOTORCYCLE AUXILIARY
SUPPLY**

Mohammad Rizky Ferdiansyah
NRP 07111440000123

Advisor
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Desain dan Implementasi Dc-Dc Forward Konverter Sebagai *Auxiliary Supply* Sepeda Motor Listrik”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Oktober 2018

Mohammad Rizky Ferdiansyah
NRP 07111440000123

**LEMBAR PENGESAHAN
DESAIN DAN IMPLEMENTASI DC-DC FORWARD
KONVERTER SEBAGAI *AUXILIARY SUPPLY*
SEPEDA MOTOR LISTRIK**

TUGAS AKHIR

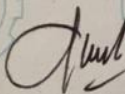
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198006032006041003

Dosen Pembimbing II



Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198109052005011002



DESAIN DAN IMPLEMENTASI DC-DC FORWARD KONVERTER SEBAGAI *AUXILIARY SUPPLY* SEPEDA MOTOR LISTRIK

Nama : Mohammad Rizky Ferdiansyah
Pembimbing I : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Pembimbing II : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Saat ini, penggunaan dc-dc konverter telah banyak digunakan diberbagai aplikasi, salah satunya yaitu digunakan pada sepeda motor listrik. Tugas akhir ini kami mendesain serta mengimplementasikan sebuah konverter yang memiliki topologi forward konverter. Forward konverter sendiri merupakan pengembangan dari topologi *buck* konverter sekaligus rangkaian lain dari *switch mode power supply*, letak perbedaan utamanya yaitu pada konverter forward terdapat transformator dengan rasio belitan tertentu yang berfungsi men -*transfer* energi serta melakukan baik *step-up* maupun *step down*.

Topologi ini bersifat *isolated* yang fungsinya mencegah terjadinya kerusakan ketika terjadi gangguan. Forward konverter pada umumnya lebih efisien dibandingkan topologi *flyback* konverter. Forward konverter yang kami rancang ini menggunakan dua sakelar (*two switch forward converter*), sumber baterai Li-Ion 60 Volt dengan kapasitas 20 Ah, dan menghasilkan keluaran 12 Volt dengan daya 100 Watt. Daya output sebesar 100 Watt tersebut akan digunakan untuk mensuplai peralatan pada kendaraan listrik, Diantaranya yaitu lampu, dll. Dari hasil pengujian implementasi menunjukkan efisiensi maksimum terjadi pada saat konverter dibebani 80% dari beban *rating* yaitu sebesar 88,8% dan konverter mampu menjaga tegangan keluaran 12 volt pada *range* tegangan sumber antara 50 – 60 volt.

Kata kunci : Topologi forward konverter, *Isolated*, peralatan pada sepeda motor listrik.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DESIGN AND IMPLEMENTATION DC-DC FORWARD CONVERTER AS ELECTRIC MOTORCYCLE AUXILIARY SUPPLY

Name : Mohammad Rizky Ferdiansyah
1st Advisor : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D..
2nd Advisor : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Currently, the use of dc - dc converter has been widely used in various applications, one of which is used on electric motorcycles. In this final project, we design and implement a converter that has a topology forward converter. Forward converter itself is the development of the buck converter topology as well as another series of switch mode power supply, the main difference is that on the forward converter there is a transformer with a certain winding ratio that serves to transfer energy and perform both step-up and step down.

This topology is isolated, whose function prevents the occurrence of damage when an interruption occurs. Forward converters are generally more efficient than converter flyback topologies. Our converter uses two switch forward converters, a 60-volt Li-Ion battery source with a capacity of 20 Ah, and produces a 12 Volt output with 100 Watt power. Power output of 100 Watt will be used to supply equipment on electric vehicles, such as lights, etc. From the results of the implementation test shows the maximum efficiency occurs when the converter is loaded with 80% of the load rating of 88,8% and the converter is able to maintain an output voltage of 12 volts in the source voltage range between 50 - 60 volts.

Keywords : Topology forward converter, isolated, applications on electric motorcycle

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir. Tugas akhir ini merupakan salah satu mata kuliah yang harus ditempuh dalam persyaratan akademik program studi S1 di Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Buku penelitian ini dapat terselesaikan atas bantuan banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak saya Nanang, Ibu saya Eli, Kakak saya Fida, dan Adik saya Zahra yang telah memberikan segala dukungan serta berkontribusi besar dalam membentuk diri pribadi saya yang selalu rendah hati, objektif, *open mind*, moderat, prestatif, dan kontributif.
2. Om Dadik dan Tante Silvy yang telah memberikan bantuan baik berupa materi, inspirasi, serta motivasinya sehingga saya mampu menyelesaikan perkuliahan ini dengan baik.
3. Bapak Heri Suryatomo, S.T., M.T., Ph.D dan Bapak Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Gedung Riset Mobil Listrik ITS yang telah memfasilitasi dalam melakukan penelitian ini.
5. Rumah Kepemimpinan, UKM TDC, Pesma Hidayatullah, dan Tim Mobil Listrik yang telah memberikan saya inspirasi, pengalaman, serta mewarnai kehidupan saya saat menjalani dunia perkuliahan

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Pada kesempatan ini penulis masih membuka pintu kritik dan saran. Sehingga kritik dan saran tersebut dapat menjadi acuan agar dapat memperbaiki tugas akhir ini. Penulis amat berharap agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, September 2018

Penulis

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metodologi	3
1.5 Sitematika Penulisan	3
1.6 Relevansi dan Manfaat	4
BAB 2 DC-DC FORWARD KONVERTER DUA SAKLAR.....	5
2.1 <i>Reset Winding</i> pada Forward Konverter	6
2.1.1 <i>Tertiary Winding</i> Forward Konverter(Dengan Satu Saklar).....	7
2.1.2 RDC <i>Clamp</i> Forward Konverter	8
2.1.3 2 - <i>Switch</i> Forward Konverter	9
2.2 Forward Konverter dengan 2 Saklar (2 Switch)	9
2.2.1 Deskripsi Rangkaian.....	10
2.3 Analisis Kondisi Tunak	10
2.3.1 Interval Waktu $0 < t \leq DrT$	14
2.3.2 Interval Waktu $DrT < t \leq (DrT + tm)$	16
2.3.3 Interval Waktu $(DrT + tm) < t \leq T$	18
2.3.4 Perhitungan Parameter Komponen.....	20
2.4 Batas Maksimum <i>Duty Cycle</i>	23
2.5 Penentuan Fungsi Transfer M(D)	23
2.6 Analisis Kondisi Dinamis	24
BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI.....	24
3.1 Diagram Blok Sistem	26
3.2 Baterai 60 Volt Sebagai <i>Input</i> Konverter	27
3.3 Desain Dc-Dc Forward Konverter Dua Saklar	29
3.3.1 Penentuan Nilai Beban.....	29

3.3.2 Penentuan Nilai Induktor L1.....	30
3.3.3 Penentuan Nilai Kapasitor C1.....	30
3.3.4 Penentuan D1 dan D2.....	31
3.3.5 Penentuan D3 dan D4.....	32
3.3.6 Penentuan MOSFET M1 dan M2.....	33
3.4 Simulasi Kondisi Tunak pada Konverter	36
3.4 Konverter Pada Kondisi Dinamis.....	37
3.6 Implementasi Konverter.....	38
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	41
4.1 Alat Pengujian.....	44
4.2 Pengujian Sinyal dan Nilai Komponen	44
4.2.1 Pengujian Pensaklaran.....	44
4.2.2 Pengujian Tegangan Sekunder Trafo dan Dioda D3,D4	47
4.2.3 Pengujian Tegangan Induktor L1	48
4.2.4 Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran	49
4.3 Pengujian Efisiensi.....	49
BAB 5 PENUTUP	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN	54
BIOGRAFI PENULIS.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gambar rangkaian forward konverter dengan <i>tertiary winding</i>	7
Gambar 2.2	Gambar rangkaian forward konverter dengan RCD <i>Clamp</i>	7
Gambar 2.3	Gambar rangkaian 2- <i>Switch</i> Forward Konverter	8
Gambar 2.4	Bentuk gelombang tegangan dan arus pada mosfet M1,M2 , Dioda D1,D2, dan trafo pada sisi primer	12
Gambar 2.5	Bentuk gelombang tegangan dan arus pada komponen induktor, dioda D3, dan dioda D4.....	13
Gambar 2.6	Rangkaian ketika interval waktu $0 < t \leq DrT$	15
Gambar 2.7	Rangkaian forward konverter dua saklar ketika interval waktu $DrT < t \leq (DrT+tm)$	18
Gambar 2.8	Rangkaian forward konverter dua saklar ketika interval waktu $(DrT + tm) < t \leq T$	19
Gambar 2.9	Diagram Blok Sistem saat Kondisi Dinamis	24
Gambar 3.1	Diagram Blok Sistem dc-dc Forward Konverter.....	26
Gambar 3.2	Gambar Dioda MUR 460.....	31
Gambar 3.3	Gambar Dioda MUR 1560.....	33
Gambar 3.4	Gambar MOSFET IRFP 460.....	34
Gambar 3.5	Rangkaian Simulasi Forward Konverter	35
Gambar 3.6	Bentuk gelombang tegangan <i>Gate- Source</i> , Tegangan <i>Drain-Source</i> , dan Arus <i>Drain-Source</i> pada MOSFET 1 dan 2	36
Gambar 3.7	Gelombang tegangan dan arus pada induktor, dioda D3, D4, dan tegangan pada sisi sekunder trafo.....	38
Gambar 3.8	Bentuk gelombang tegangan input (VS) dan tegangan <i>output</i> (Vo).....	39
Gambar 3.9	Simulasi kondisi dinamis saat konverter beroperasi secara <i>close loop</i>	40
Gambar 3.10	Implementasi Dc-Dc Forward Konverter	42
Gambar 4.1	Bentuk Sinyal Pensaklaran MOSFET 1	45
Gambar 4.2	Bentuk Sinyal Pensaklaran MOSFET 2	46
Gambar 4.3	Hasil Pengujian Tegangan Sekunder,Dioda 3, dan Dioda 4	47

Gambar 4.4	Pengujian Arus Induktor L1	48
Gambar 4.5	Bentuk Sinyal Tegangan Masukan dan Keluaran.....	49
Gambar 4.7	Gambar grafik efisiensi konverter pada beban antara 40-100 Watt.....	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tiga Modifikasi Dasar Forward Konverter.....	7
Tabel 2.2 Tiga Mode Operasi pada Forward Konverter Dua Saklar.....	11
Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai 60 Volt 20 Ah.....	27
Tabel 3.2 Spesifikasi Awal Desain Konverter.....	29
Tabel 3.3 Parameter Komponen Berdasarkan Hasil Perhitungan.....	34
Tabel 3.4 Parameter Komponen Implementasi Forward Konverter.....	41
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Konverter.....	50

--Halaman Sengaja dikosongkan--

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi dalam setiap aspek kehidupan, hal ini sebanding dengan mobilitas manusia yang semakin tinggi. Hal ini ditunjukkan dengan pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang semakin meningkat, peningkatan ini jika tidak diatasi maka akan meningkatkan konsumsi bahan bakar minyak (BBM) dan pencemaran udara di Indonesia. Jika konsumsi BBM semakin meningkat maka cadangan minyak bumi dalam negeri akan semakin berkurang.

Teknologi sepeda motor listrik mulai berkembang pesat seiring dengan adanya isu cadangan akan minyak yang kian menipis. Untuk menghadapi era kendaraan listrik, Indonesia tidak diam begitu saja. GESITS akan hadir menjadi salah satu pionir dalam negeri. Sesuai dengan informasi dari gedung riset mobil listrik ITS, GESITS akan diproduksi massal pada tahun 2020 dengan kapasitas 100.000 unit / tahun. Ada beberapa kendala yang dimiliki oleh pihak Molina, Salah satunya yaitu beberapa komponen dari kendaraan listrik tersebut masih bergantung produk impor dari negara lain. Salah satu komponennya yaitu Dc-Dc konverter 100 watt. Oleh karena itu, diperlukan sebuah penelitian terkait desain dan implementasi sebuah konverter pada kendaraan listrik.

Ada beberapa topologi dasar pada konverter yaitu topologi *buck*, *boost*, *sepic*, *cuk*, *flyback*, dll. Topologi tersebut digunakan berdasarkan kebutuhan akan aplikasi yang digunakan. Forward konverter merupakan topologi konverter yang sesuai untuk dikembangkan pada sepeda motor listrik mengingat sifatnya yang *isolated* serta mampu beroperasi pada rentang daya 80 – 200 Watt. Forward konverter sendiri merupakan turunan dari topologi *buck* konverter, perbedaan utamanya yaitu pada forward konverter terdapat transformator yang fungsinya mentransfer energi yang mampu melakukan baik *step-up* maupun *step-down*. Topologi ini telah banyak diaplikasikan di berbagai aplikasi. Sifatnya yang *isolated*, desain trafo yang tidak terlalu rumit, serta efisiensi yang cukup tinggi menjadi salah satu alasan dipilihnya topologi ini [1].

1.2 Permasalahan

Konverter pada kendaraan listrik pada implementasinya ada yang sifatnya *non-isolated* dan sisanya bersifat *isolated*. Kelemahan dari *non-isolated* yaitu berbahaya ketika terjadi gangguan disisi beban [2], sedangkan konverter *isolated* yang ada kekurangannya yaitu memiliki efisiensi cukup rendah misalnya *flyback* konverter. Oleh karena itu, dibutuhkan konverter yang sifatnya *isolated* serta memiliki efisiensi cukup baik. permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah mendesain dan mengimplementasikan dc-dc forward konverter sebagai *auxiliary supply* sepeda motor listrik.

1.3 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Mendesain dan mengimplementasikan DC-DC forward konverter 100 watt sebagai *auxiliary supply* pada sepeda motor listrik.
2. Merancang sebuah konverter yang sifatnya *isolated* terhadap *grounding*.
3. Membuat sebuah konverter yang memiliki efisiensi cukup baik.
4. Membandingkan dan menganalisis hasil implementasi DC-DC forward konverter dari hasil desain dengan hasil simulasi perangkat lunak.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Desain dan implementasi konverter dilakukan menggunakan topologi forward konverter dengan menggunakan dua sakelar.
2. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang ada di pasaran dan peralatan di Laboratorium Konversi Energi Listrik.
3. Pengujian alat menggunakan sumber tegangan DC variabel dan beban jenis resistor.
4. Simulasi pada penelitian ini menggunakan *software* PSIM.
5. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dalam kondisi *steady state*.
6. Konverter ini diaplikasikan pada sepeda motor listrik yang memiliki kapasitas baterai 60 volt 20 Ah.

1.5 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari :

1. Studi literatur
Mempelajari topologi forward konverter dengan menggunakan dua sakelar serta memahami bentuk gelombang yang dihasilkan dari topologi ini.
2. Desain dan simulasi alat
Rangkaian forward konverter dengan dua sakelar disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak PSIM, simulasi dilakukan berdasarkan sumber literatur yang telah dibaca oleh penulis. Data hasil simulasi merupakan data primer yang digunakan sebagai pembanding dari implementasi alat yang dikerjakan oleh penulis.
3. Implementasi Alat
Hasil simulasi diimplementasikan dengan membuat rangkaian forward konverter dengan dua sakelar. Dalam proses implementasi alat dilakukan pemilihan dan pembelian komponen sesuai dengan desain yang telah dipersiapkan. Komponen yang digunakan diantaranya saklar MOSFET, Kapasitor, Induktor, Dioda, dan IC *PWM Controller*. Setelah itu, dilakukan pengujian dan pengukuran pada tegangan dan arus pada alat yang telah dibuat.
4. Penyusunan Laporan
Setelah dilakukan pengujian implementasi alat DC-DC forward konverter dengan dua saklar maka data yang didapatkan akan dianalisis dan dibandingkan dengan data primer hasil simulasi yang telah dibuat. Hasil analisis akan digunakan dalam pembuatan kesimpulan dan semua hasil yang telah dikerjakan diatas akan ditulis menjadi sebuah buku penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terbagi atas lima bagian dan masing masing bab terurai sebagai berikut :

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi penelitian ini.

Bab 2 Dasar Teori

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang Dc-Dc forward konverter sebagai *auxiliary supply* sepeda motor listrik. Pada bab 2 akan dibahas mengenai *reset winding* pada forward konverter, analisis kondisi dinamik pada forward konverter.

Bab 3 Desain, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini berisi mengenai desain forward konverter dengan dua sakelar secara matematis, simulasi rangkaian menggunakan perangkat lunak PSIM, dan implementasi DC-Dc forward konverter dengan dua sakelar. Desain rangkaian secara matematis berupa penurunan rumus untuk mencari nilai parameter rangkaian yang digunakan seperti induktor dan kapasitor.

Bab 4 Pengujian dan analisis data

Bab ini berisi pengujian dan analisis data untuk membandingkan hasil implementasi Dc-Dc forward konverter dua sakelar dengan hasil desain dan simulasi.

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi dan Manfaat

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan produk konverter di gedung riset mobil listrik ITS.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil masalah serupa untuk penelitian.
3. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan konverter, khususnya mengenai Dc-Dc forward konverter dengan dua sakelar untuk *auxiliary supply* pada sepeda motor listrik.

BAB 2

DC-DC Forward Konverter Dua Sakelar

Forward konverter merupakan konverter yang banyak digunakan pada aplikasi SPMS (*Switch Mode Power Supply*). Konverter jenis ini menghasilkan tegangan output DC yang terisolasi (*Isolated*) dan terkontrol (*Regulated*). Jika dibandingkan dengan konverter *flyback*, Topologi forward konverter memiliki efisiensi lebih tinggi, desain trafo yang lebih sederhana, serta mampu beroperasi pada daya 100 – 500 Watt [3]. Pada bab ini akan dipaparkan terkait *reset winding* pada forward konverter, analisis forward konverter baik topologi konvensional maupun modifikasi (*two switch*) pada kondisi *steady state*.

2.1 *Reset Winding* pada Forward Konverter

Forward konverter sendiri merupakan turunan dari topologi *buck* konverter, perbedaan utama pada kedua topologi tersebut yaitu pada forward konverter terdapat transformator yang fungsinya memberikan sifat isolasi pada output serta mentransfer energi yang mampu melakukan baik *step-up* maupun *step down*. Pada *flyback* konverter, prinsipnya yaitu energi disimpan di belitan tersier (Lm) ketika sakelar berada pada kondisi tertutup dan energi listrik tersebut dikirim ketika sakelar berada pada kondisi terbuka. Berbeda dengan forward konverter, energi listrik dikirim dari sumber ke beban saat saklar berada pada kondisi on (tertutup) dan ketika saklar pada kondisi off (terbuka) maka pada transformer terjadi proses *reset winding* [1]. Apabila proses *reset winding* tidak dilakukan maka hal ini akan mengakibatkan arus pada Lm akan terus meningkat di setiap *switching cycle*, sehingga hal ini menimbulkan saturasi pada inti trafo [4]. Pada forward konverter, energi yang tersimpan pada *magnetizing inductor* (Lm) pada prinsipnya tidak berpartisipasi dalam proses *power transfer*, sehingga energi yang tersimpan tersebut harus dihilangkan (*reset*) [4]. Metode untuk melakukan *reset winding* inilah yang menentukan modifikasi forward konverter yang akan kita gunakan. Secara umum ada tiga jenis teknik standard dalam melakukan proses *reset winding* diantaranya :

- a. *Tertiary Winding* (Dengan Satu Saklar)
- b. *RCD Clamp*
- c. *2-Switch Forward* (Dengan Dua Saklar)

Berikut ini merupakan tabel yang menunjukkan kelebihan dan kekurangan ketiga modifikasi pada forward konverter :

Tabel 2.1 Tiga modifikasi dasar forward konverter

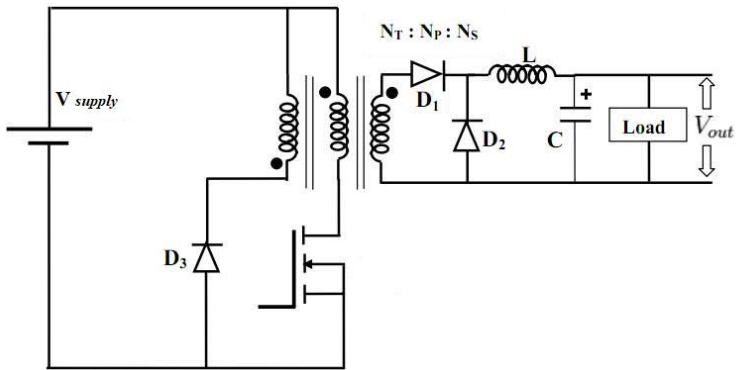
No	Jenis Modifikasi	Kelebihan	Kekurangan
1	<i>Tertiary Winding</i> (Dengan Satu Saklar)	- <i>Duty Cycle</i> bisa diatur >50%	-Tegangan <i>peak</i> pada Mosfet bisa mencapai > 2.Vin - Membutuhkan 3 belitan pada transformator
2	RCD <i>Clamp</i>	- <i>Duty Cycle</i> bisa diatur >50%	-Membutuhkan perhitungan R dan C yang tepat
3	2-Switch <i>Forward</i>	-Mudah dalam Pengimplemen- tasiannya -Besarnya <i>peak</i> Pada Mosfet <i>equal</i> Vin	-Penambahan komponen Mosfet - <i>High Side Driver</i>

Setelah mengetahui kelebihan dan kekurangan ketiga modifikasi pada forward konverter, berikut ini merupakan gambar skema masing masing dari ketika jenis modifikasi tersebut :

2.1.1 *Tertiary winding* Forward Konverter (Satu Saklar)

- Gambar Rangkaian

Gambar 2.1 merupakan gambar rangkaian *tertiary winding* forward konverter (satu saklar). Topologi ini merupakan topologi dasar pada forward konverter. Salah satu kelemahan pada topologi ini yaitu adanya penambahan belitan tersier pada trafo, sehingga menimbulkan kesulitan dalam mendesain trafo tersebut.

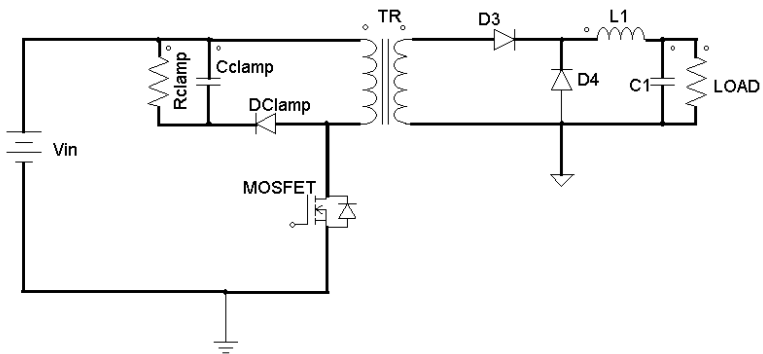


Gambar 2.1 Gambar rangkaian forward konverter dengan *tertiary winding*.

2.1.2 RCD Clamp Forward Konverter

- Gambar Rangkaian

Gambar 2.2 merupakan gambar rangkaian RCD *Clamp* Forward Konverter.

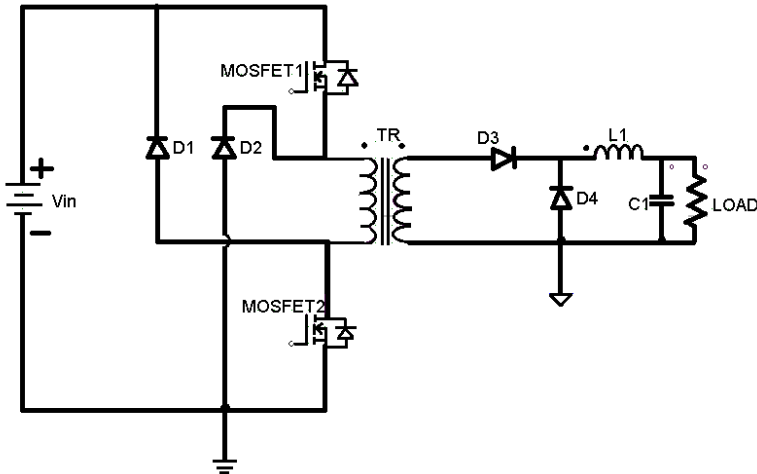


Gambar 2.2 Gambar rangkaian forward konverter dengan RCD *Clamp*.

2.1.3 Dual Switch Forward Konverter

- Gambar Rangkaian

Gambar 2.3 merupakan gambar rangkaian 2 – Switch Forward Konverter [5].



Gambar 2.3 Gambar rangkaian 2- Switch Forward Konverter.

2.2 Forward Konverter dengan 2 Saklar (2 Switch)

Forward konverter dengan dua saklar merupakan suatu pengembangan dari forward konverter konvensional yaitu dengan menambahkan satu buah saklar elektronik berupa MOSFET pada sisi primer transformator. Selain itu, pada konverter ini dilengkapi *core reset winding* yang mampu meningkatkan efisiensi pada konverter. Pengembangan topologi ini dilakukan mengingat masih banyak kekurangan pada forward konverter konvensional, diantaranya :

- Kapabilitas power yang rendah dibanding dengan topologi *full* dan *half bridge*.
- Penambahan belitan tersier pada transformator membuat desain trafo menjadi lebih rumit dibandingkan dengan menggunakan topologi dua saklar.

Gambar 2.3 merupakan gambar rangkaian forward konverter menggunakan dua saklar (2 Switch). Besaran nilai tegangan keluaran

konverter dapat diperoleh dengan melakukan analisa ketika sakelar berada pada keadaan terbuka dan tertutup.

2.2.1 Deskripsi Rangkaian

Rangkaian forward konverter dua saklar ditunjukkan oleh gambar 2.3. Kedua mosfet (M1 dan M2) yang terhubung pada sumber merupakan N-Channel Mosfet. Kedua dioda (D1 dan D2) yang terhubung pada input sumber tegangan dan belitan primer transformator berfungsi untuk melakukan proses demagnetisasi. Dua dioda (D3 dan D4) yang terhubung pada trafo sisi sekunder merupakan dioda *rectifier* atau dioda penyearah. Vin merepresentasikan sumber tegangan dan LOAD mewakili resistansi beban. Periode peralihan dilambangkan dengan T_s , yang merupakan kebalikan dari frekuensi switching (fs). Rasio *duty cycle* dilambangkan dengan D . Induktansi magnetisasi dilambangkan dengan L_{mag} .

2.3 Analisis Kondisi Tunak

Analisis kondisi tunak merupakan analisis yang bertujuan untuk menganalisa prinsip kerja dari konverter melalui mode operasinya. DC-DC Forward konverter dengan dua saklar memiliki tiga mode operasi, yaitu ketika saklar M1,M2 tertutup dan terbuka. Mode operasi konverter dapat dianalisis dengan mengamati karakteristik masing masing komponen pada saat kondisi tunak. Konverter ini beroperasi secara *continuous conduction mode* (CCM) atau dengan kata lain arus pada induktor selalu kontinyu [6]. Semua komponen dianggap dalam kondisi ideal. Tegangan pada kapasitor dianggap konstan dalam satu periode pensaklaran. Berikut ini beberapa asumsi yang dibuat dalam melakukan analisis terhadap forward konverter dengan dua saklar, diantaranya :

1. Induktansi kebocoran dan kapasitansi dari transformator diabaikan.
2. Sumber tegangan input ideal dengan impedansi keluaran sama dengan nol.
3. *Parasitic capacitance* dan *lead inductance* dari dioda diasumsikan sama dengan nol.

Gambar 2.4 dan 2.5 merupakan bentuk gelombang tegangan dan arus pada masing-masing komponen forward konverter dua saklar. Perlu kita ketahui bahwa pada forward konverter dua saklar beroperasi pada tiga

mode. Tabel 2.2 di bawah ini menunjukkan secara lebih rinci operasi ketiga mode tersebut

Tabel 2.2 Tiga mode operasi pada forward konverter dua saklar

	Mosfet 1 & 2	Dioda 3	Dioda 4	Dioda 1 & 2
Mode 1	ON	ON	OFF	OFF
Mode 2	OFF	OFF	ON	ON
Mode 3	OFF	OFF	ON	OFF

Tabel 2.2 diatas mennunjukkan ketiga operasi pada forward konverter dua saklar. Saklar mosfet pada konverter ini bekerja secara *parallel operation* atau bekerja bersamaan. Karakteristik ketiga mode ini direpresentasikan pada analisis kondisi tunak serta digambarkan secara visual pada gambar 2.4 dan 2.5.

Pada topologi dc –dc forward konverter dengan dua saklar memiliki tiga mode. Mode ketiga pada topologi ini sebagai waktu peralihan antara mode 2 menuju mode 1. Mode 3 ini berfungsi untuk memastikan energi yang tersimpan pada L_m trafo benar benar kosong, sehingga sinyal yang dihasilkan memiliki *spike* tegangan dan arus yang kecil.

Keterangan :

V_S = Tegangan sumber (Volt)

V_{Out} = Tegangan keluaran (Volt)

D_r = Duty cycle (%)

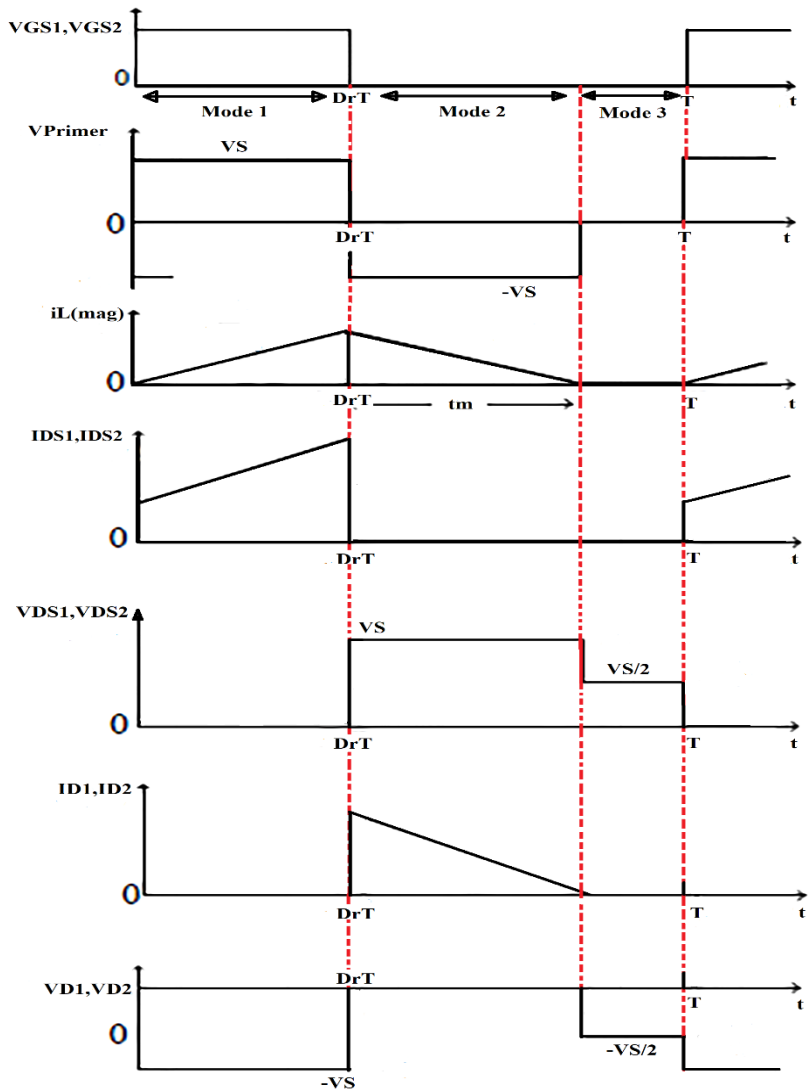
V_s = Tegangan Sekunder

P = Daya (Watt)

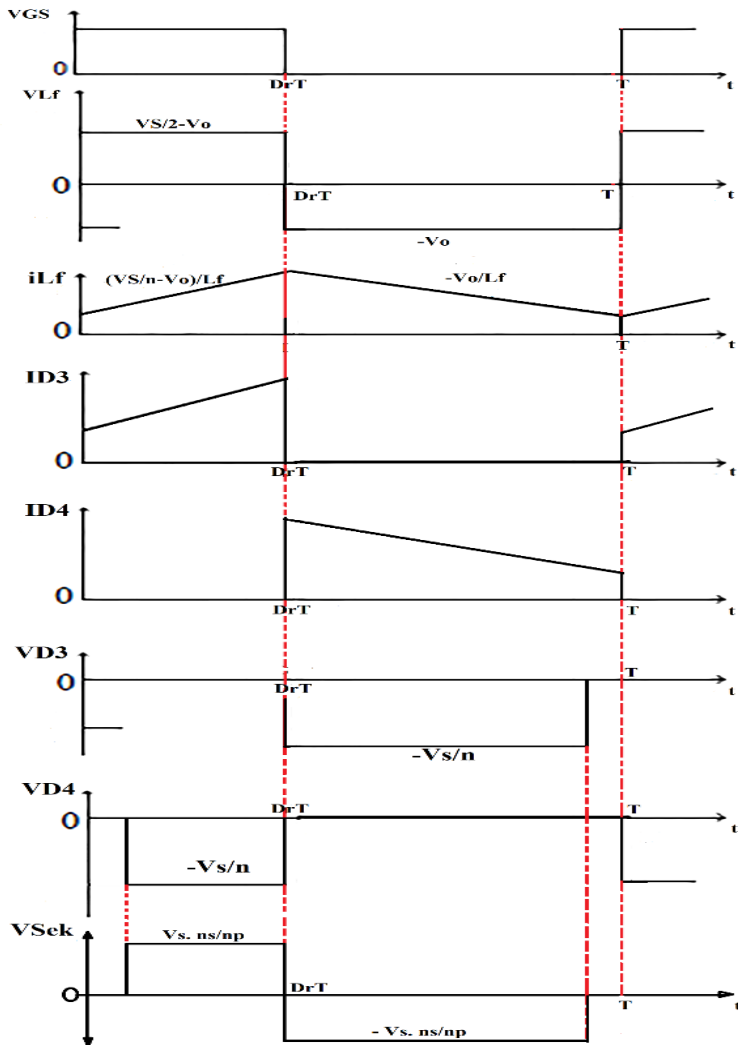
f_s = Frekuensi *switching* (Hertz)

n_p = Jumlah belitan primer

n_s = Jumlah belitan sekunder



Gambar 2.4 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada mosfet M1,M2 , Dioda D1,D2, dan trafo pada sisi primer.



Gambar 2.5 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada komponen induktor, dioda D3, dan dioda D4.

2.3.1 Interval Waktu $0 < t \leq DrT$

Selama interval waktu $0 < t \leq DrT$, kedua *switch* mosfet akan diaktifkan secara bersamaan oleh pulsa PWM. Gambar 2.6(a) merupakan rangkaian ekivalen pada forward konverter dua saklar selama interval waktu $0 < t \leq DrT$. Hubungan antara tegangan dan rasio belitan yaitu [3] :

$$V_p : V_s = N_p : N_s \quad , \quad (2.1)$$

Dimana N_p dan N_s adalah jumlah lilitan primer dan sekunder. Ketika dua saklar Mosfet (M_1 dan M_2) berada pada kondisi ON, induktansi magnetisasi L_{mag} pada trafo dan belitan primer memiliki tegangan yang sama [3], dengan persamaan :

$$V_p = V_{lmag} = V_s = L_{mag} \frac{di_L(mag)}{dt} \quad (2.2)$$

Initial condition pada induktansi magnetisasi i_{lmag} adalah nol [3]. Oleh karena itu, arus tersebut dapat direpresentasikan dengan [3],[7],

$$i_L(mag)(t) = \frac{1}{L_{mag}} \int_0^t V(mag) dt = \frac{1}{L_{mag}} \int_0^t V_s \cdot dt = \frac{V_s}{L_{mag}} \cdot t \quad (2.3)$$

Arus magnetisasi memiliki nilai puncak saat $t = Dr \cdot T$ [3], sehingga,

$$\Delta i_L(mag) = i_L(mag)(DrT) = \frac{V_s \cdot Dr \cdot T}{L_{mag}} = \frac{Dr \cdot V_s}{f_s \cdot L_{mag}}, \quad (2.4)$$

Dimana,

$$\Delta i_{Lm}(max) = \frac{Dr_{min} \cdot V_s \max}{f_s \cdot L_{mag}(min)} \quad (2.5)$$

Dari persamaan (2.5) nilai minimum induktansi magnetisasi adalah

$$L_{mag} \geq \frac{Dr_{min} \cdot V_s \max}{f_s \cdot \Delta i_{Lm}(max)}, \quad (2.6)$$

Dari persamaan (2.1), Persamaan tegangan pada belitan sekunder yaitu

$$V_s = \frac{V_p}{n} = \frac{V_s}{n} \quad (2.7)$$

Sehingga tegangan pada filter induktor L1 dapat direpresentasikan dengan persamaan [3],

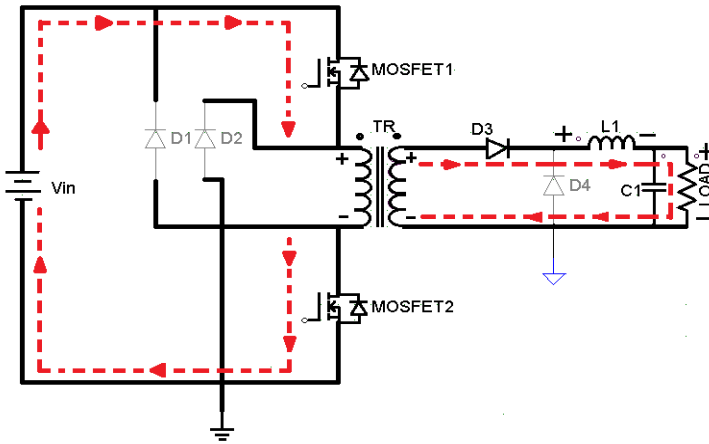
$$V_{Lf} = \frac{V_S}{n} - V_o = L_f \frac{di_{Lf}}{dt} \quad (2.8)$$

Persamaan tegangan pada dioda D4 yaitu [3],

$$V_{D4} = -V_{Lf} - V_o = -\frac{V_S}{n} \quad (2.9)$$

Tegangan yang melalui dua dioda demagnetisasi (D1 dan D2) yaitu [3],

$$V_{D1} = V_{D2} = -V_S \quad (2.10)$$



Gambar 2.6 Rangkaian ketika interval waktu $0 < t \leq DrT$

2.3.2 Interval Waktu $DrT < t \leq (DrT + t_m)$

Rangkaian ekivalen selama interval waktu $DrT < t \leq (DrT + t_m)$ ditunjukkan pada gambar 2.7. Pada sisi primer transformator, dua saklar M1 dan M2 berada pada kondisi *off* (terbuka), Dioda D1 dan D2 yang berfungsi sebagai *clammer* melakukan proses *clamp* (menjepit tegangan) pada tegangan mosfet M1 dan M2. Di sisi sekunder pada trafo, Dioda D3 berada pada kondisi *off* (terbuka), sedangkan D4 pada

kondisi ON (tertutup). Persamaan tegangan yang melintasi filter induktor L_f yaitu [3],

$$V_{Lf} = -V_o = L_f \frac{di_{Lf}}{dt} \quad (2.11)$$

Dari persamaan (2.11) arus yang melintasi induktor L_f dan dioda $D4$ yaitu :

$$\begin{aligned} i_{Lf} = i_{D4} &= \frac{1}{L_f} \int_{DrT}^t V_{Lf} dt + i_{Lf}(DrT) = -\frac{V_o}{L_f} \int_{DrT}^t dt + i_{Lf}(DrT) \\ &= -\frac{V_o}{L_f} (t - DrT) + i_{Lf}(DrT) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Nilai *peak to peak* ripple arus pada filter induktor $L1$ yaitu [3] :

$$\Delta i_{Lf} = i_{Lf}(DrT) - i_{Lf} = \frac{V_o T(1 - Dr)}{L_f} = \frac{V_o(1 - Dr)}{f_s L_f} \quad (2.13)$$

Tegangan yang melintasi trafo primer dan induktansi magnetisasi L_{mag} yaitu [3] :

$$v_p = V_{L(mag)} = -V_S = L_{mag} \frac{di_{L(mag)}}{dt} \quad (2.14)$$

Dari persamaan (2.14), arus yang melewati dioda $D1$ dan $D2$ direpresentasikan dengan persamaan,

$$\begin{aligned} i_{D1} = i_{D2} = i_{L(mag)} &= \frac{1}{L_{mag}} \int_{DrT}^t V_{L(mag)} dt + i_{L(mag)}(DrT) = \\ &= \frac{-V_S}{L_{mag}} (t - DrT) + \frac{DrV_S}{f_s L_{mag}}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

Arus maksimum yang terjadi pada dioda $D1$ dan $D2$ terjadi saat waktu $t = DrT$ yang dirumuskan [3],

$$i_{D1} = i_{D2} = i_{D1}(DrT) = \frac{Dr V_S}{f_s L_{mag}} \quad (2.16)$$

Dari persamaan (2.16), tegangan yang melintasi trafo sekunder dan dioda D3 yaitu,

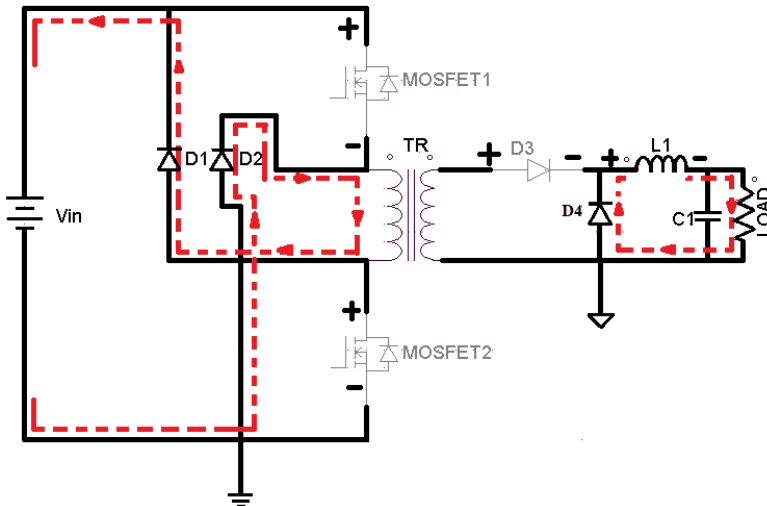
$$V_s = V_{D3} = \frac{V_S}{n}, \quad (2.17)$$

Tegangan pada dua Mosfet M1 dan M2 yaitu [3],

$$V_{m1} = V_{m2} = V_S \quad (2.18)$$

Arus magnetisasi mencapai nol saat $t = DrT + t_m$ pada interval waktu ini.

Pada topologi dc –dc forward konverter dengan dua saklar memiliki tiga mode. Mode ketiga pada topologi ini sebagai waktu peralihan antara mode 2 menuju mode 1. Mode 3 ini berfungsi untuk memastikan energi yang tersimpan pada L_m trafo benar benar kosong, sehingga sinyal yang dihasilkan memiliki *spike* tegangan dan arus yang kecil.



Gambar 2.7 Rangkaian forward konverter dua saklar ketika interval waktu $DrT < t \leq (DrT + t_m)$

2.3.3 Interval Waktu ($DrT + tm$) < $t \leq T$

Gambar 2.8 menggambarkan rangkaian ekivalen forward konverter dua saklar ketika interval waktu ($DrT + tm$) < $t \leq T$. Dua mosfet M1 dan M2 berada pada kondisi *off* (terbuka), dioda D1,D2, dan D3 juga berada pada kondisi *off* (terbuka), sedangkan dioda *free wheeling* D4 berada pada kondisi *on* (tertutup). Tegangan yang melintasi belitan trafo, $Lmag$, dan dioda D4 yaitu $VS = VL(mag) = VD4 = 0$ [3]. Tegangan yang terukur pada dioda *clamping* D1 dan D2 yaitu [3],

$$Vm1 = Vm2 = \frac{VS}{2} \quad (2.19)$$

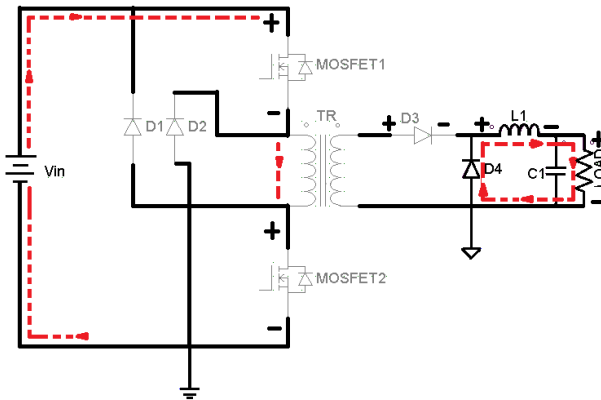
dan

$$VD1 = VD2 = \frac{-VS}{2} \quad (2.20)$$

Sesuai dengan persamaan (2.11) dan (2.12), tegangan yang melintasi filter induktor L1 dan arus pada dioda D4 yaitu,

$$VLf = -Vo = Lf \frac{di}{dt} \quad (2.21)$$

$$iLf = iD4 = -\frac{Vo}{Lf} (t - (DrT + tm)) + iLf(DrT + tm) \quad (2.22)$$



Gambar 2.8 Rangkaian forward konverter dua saklar ketika interval waktu ($DrT + tm$) < $t \leq T$.

2.3.4 Penurunan Parameter Komponen

Dc-Dc forward konverter dua saklar memiliki beberapa parameter yang harus ditentukan nilainya. Parameter-parameter yang perlu ditentukan nilainya yaitu rasio belitan pada trafo (n), jumlah belitan pada sisi primer, sekunder, nilai induktor L1, dan kapasitor C1.

a. Rasio Belitan Trafo

Sesuai dengan persamaan (2.34), dengan mengasumsikan nilai *duty cycle* sebesar $\leq 50\%$ maka kita dapat menentukan besar nilai rasio belitan pada trafo tersebut,

$$\frac{V_o}{V_s} = D_{r \text{ maks.}} \cdot \frac{n_s}{n_p}$$
$$n < \frac{V_s \cdot D_{r \text{ maks.}}}{V_o} = \frac{60 \text{ Volt} \cdot 50\%}{12,24} = 2,5$$

Karena nilai $n < 2,5$ maka kita tentukan nilai n sebesar 2,25

- Jadi rasio belitan(n) pada trafo tersebut yaitu 9/4.

b. Penentuan besar nilai *duty cycle*

Setelah nilai rasio belitan pada trafo (n) diketahui maka besarnya nilai *duty cycle* dapat ditentukan, sesuai dengan persamaan (2.34) maka besarnya nilai *duty cycle* pada konverter yaitu :

$$D_r = \frac{V_o}{V_s} \cdot n = \frac{12,24}{60} \cdot 2,25 = 45\%$$

c. Jumlah belitan primer dan sekunder

Inti trafo yang kami gunakan yaitu dengan menggunakan inti tipe ETD 49, Oleh karena itu jumlah minimal belitan pada sisi primer trafo agar tidak terjadi saturasi pada inti yaitu,

$$n_p > \frac{V_s \text{ max.} \cdot D_{\text{max.}} \cdot \frac{1}{f_s}}{B_{\text{sat.}} \cdot A_e} \quad (2.23)$$

Dimana,

$$V_{S,max} = 60$$

$$D_{max} = 50\%$$

$$f_s = 10.000 \text{ Hz}$$

$$B_{sat} = 0.3 \text{ T}$$

$$A_e = 211 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$n_p > \frac{60 \text{ Volt} \cdot 0.5 \cdot \frac{1}{10.000}}{0.3 \times 211 \cdot 10^{-6}}$$

$$n_p > 47,4$$

$n_p \approx 72$, karena jumlah minimal belitan primer yaitu 48 belitan ,

- Maka pada belitan primer kita atur sejumlah 72 belitan, sehingga sesuai dengan rasio belitan trafo didapatkan jumlah belitan sekunder sejumlah 32 belitan.

d. Persamaan Parameter Komponen Induktor L1

Untuk menentukan nilai minimal pada induktor L1, pertama kita tentukan nilai minimal arus DC yang melintasi induktor tersebut,

Pada percobaan, beban minimum yang kita pergunakan yaitu 40 watt, sehingga $IL_{1min} = 3,2 \text{ A}$

Agar arus pada induktor tidak mencapai nol, arus *peak to peak* harus memiliki nilai kurang dari dua kali nilai IL_{1min} .

$$\Delta i_{Lo} < 6,4 \text{ A}$$

Nilai *peak to peak* arus pada induktor bisa dihitung ketika kondisi saklar pada MOSFET dalam keadaan *ON*,

$$\Delta i_{Lo} = \left(\frac{n_s}{n_p} \cdot V_S - V_o \right) \cdot \frac{1}{L_o} \cdot t_{on} \quad (2.24)$$

Sesuai dengan persamaan (2.28),

$$\frac{V_o}{V_S} = \frac{n_s}{n_p} \cdot D_r, D_r = t_{on} \cdot f_s \text{ maka nilai } t_{on} \text{ yaitu,}$$

$$t_{on} = \frac{V_o}{V_S} \cdot \frac{n_p}{n_s} \cdot \frac{1}{f_s} \quad (2.25)$$

Kita substitusi persamaan (2.25) ke persamaan (2.24) , kita dapatkan persamaan,

$$\begin{aligned} \Delta i_{L1} &= \left(1 - \frac{1}{V_S} \cdot \frac{n_p}{n_s} \cdot V_o\right) \cdot \frac{1}{L1} \cdot V_o \cdot \frac{1}{f_s}, \\ L1 &= \left(1 - \frac{1}{V_S} \cdot \frac{n1}{n2} \cdot V_o\right) \cdot \frac{1}{\Delta i_{L1}}, V_o \cdot \frac{1}{f_s} \end{aligned} \quad (2.26)$$

e. Persamaan Parameter Komponen Kapasitor C1

Filter kapasitor C1 dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$C_1 = \left(V_o + \frac{\Delta V_o}{2}\right) \left(\frac{1-D}{R_o \Delta V_o f}\right) \quad (2.27)$$

f. Besar Nilai Rout pada konverter

Untuk menentukan nilai Rout, kita dapat menggunakan persamaan (2.28),

$$R_{out} = \frac{V^2}{P} \quad (2.28)$$

2.4 Batas maksimum *duty cycle*

Sama seperti forward konverter konvensional, pengaturan *core reset* sangatlah vital/penting untuk pengoperasian yang aman pada forward konverter dua saklar. Jika pada inti tidak sepenuhnya *direset*, hal ini mengakibatkan semakin banyak energi yang terakumulasi dalam inti transformator, sehingga terjadi *error* pada konverter ketika terjadi pergantian siklus *switching*. Oleh karena itu, ada nilai maksimum dari *duty cycle* yang diizinkan untuk memastikan pengoperasian konverter yang aman. Persamaan berikut menyatakan kondisi untuk reset inti pada transformator,

$$(D_r T + t_m) \leq T \quad (2.29)$$

Saat kondisi $Dr_{max}T$,

$$Dr_{max}T + t_m = T \quad (2.30)$$

Dimana,

$$t_m = (1 - Dr_{max})T \quad (2.31)$$

Dari ketiga persamaan tersebut didapatkan persamaan keseimbangan,

$$Dr_{max}T = (1 - Dr_{max})T \quad (2.32)$$

Oleh karena itu, pada konverter ini tidak direkomendasikan menggunakan parameter *duty cycle* > 0.5 [3].

2.5 Penentuan Fungsi Transfer $M(D)$ Tegangan Dc

Dari gambar (2.5), (2.6) dan persamaan (2.8),(2.11), persamaan fungsi transfer tegangan Dc yaitu,

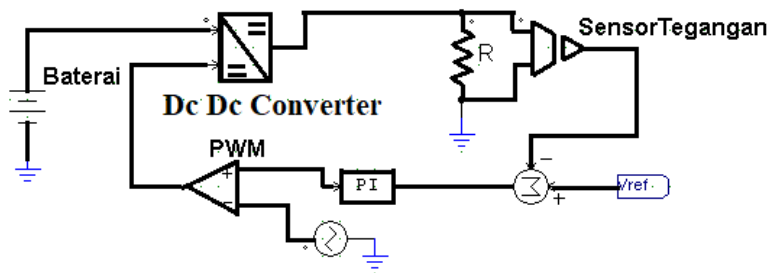
$$M(D) = \frac{V_o}{V_S} = \frac{I_s}{I_o} = \frac{Dr}{n} \quad (2.33)$$

Jadi, persamaan *output* tegangan pada forward konverter dua saklar yaitu,

$$V_o = V_S \cdot \frac{Dr}{n} = V_S \cdot Dr \cdot \frac{n_s}{n_p}, \text{ untuk } Dr \leq Dr_{max} \quad (2.34)$$

2.6 Analisis kondisi dinamis

Analisis kondisi dinamis merupakan analisis kondisi pada konverter saat tegangan masukan konverter memiliki nilai yang berubah-ubah. Hal tersebut akan berpengaruh pada keluaran dari konverter, oleh karena itu dibutuhkan kontrol tertutup agar menjaga tegangan secara konstan pada keluaran konverter ketika diberi sumber yang berubah-ubah.



Gambar 2.9 Diagram Blok Sistem saat Kondisi Dinamis

Gambar 2.9 merupakan diagram blok sistem saat kondisi dinamis. Tegangan keluaran dari konverter akan fluktuatif bergantung pada *input* dari konverter itu sendiri. Tegangan keluaran konverter dapat dijaga konstan ketika tegangan masukan konverter berubah-ubah dengan cara mengatur besar *duty cycle* yang diberikan. Tujuan dari kontrol *duty cycle* yaitu mengatur tegangan keluaran secara konstan sesuai dengan tegangan yang diinginkan. Penentuan besar *duty cycle* diatur dengan pengaturan umpan balik pengendali *Proportional-Integral* (PI) yang dapat menghitung dan meminimalisir nilai selisih antara keluaran terhadap referensi yang diberikan pada sistem.

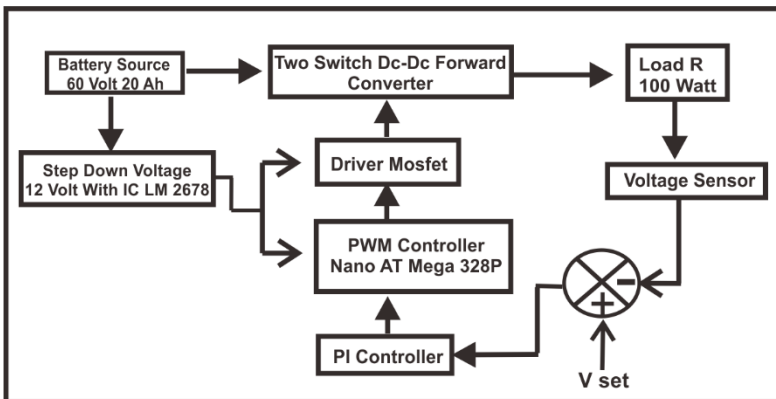
BAB 3

DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

Dalam bab ini, akan dibahas mengenai proses desain, simulasi, dan implementasi forward konverter dua saklar sebagai *auxiliary supply*. Proses desain dilakukan dengan menghitung dan menentukan komponen-komponen yang akan digunakan pada implementasi alat. Simulasi dilakukan untuk memastikan bahwa konverter dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Hasil dari desain dan simulasi ini digunakan sebagai dasar implementasi dc-dc forward konverter dua saklar.

3.1 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem menjelaskan mengenai sistem kerja forward konverter dua saklar sebagai *auxiliary supply* secara keseluruhan. Diagram blok terdiri dari sumber berupa sumber baterai, konverter, beban lampu, driver MOSFET, dan kontroler dengan IC At Mega 328p. Gambar 3.1 dibawah ini menunjukkan blok diagram dari sistem konverter.



Gambar 3.1 Diagram blok sistem dc – dc forward konverter dua saklar

Berdasarkan gambar 3.1, tegangan masukan dari konverter menggunakan sumber DC *input* berupa baterai 60 Volt. Sinyal *switching* PWM untuk *trigger* pensaklaran MOSFET dihasilkan dengan menggunakan IC PWM kontroller At mega 328, yang mana sinyal

switching PWM tersebut memiliki amplitudo sebesar ± 5 volt. Driver MOSFET berfungsi sebagai peningkat tegangan masukan tegangan pada *gate* MOSFET. Tegangan keluaran pada konverter memiliki nilai sebesar 12 volt yang merupakan tegangan untuk mensuplai peralatan lampu pada sepeda motor listrik. Pada konverter diberikan kontroller yang berfungsi untuk menjaga nilai tegangan keluaran agar tetap konstan ketika tegangan masukannya berubah pada *range* sebesar 50 – 60 volt.

3.2 Baterai 60 Volt Sebagai *Input* Konverter

Table 3.1 Spesifikasi Baterai 60 Volt 20 Ah

Tipe Baterai	Li- Ion Baterai	
Tegangan Nominal	60 Volt	
Kapasitas Nominal	20 Ah	
Resistansi <i>Cell Source</i>	38mOhm	
Baterai Energi	120 Wh	
<i>Cell Assmby</i>	Li 18650-3.7 Volt 2500 mah- 13S8P	
Pengisian	Model Pengisian	CC/CV
	Waktu Pengisian	2A Charger : 10 Jam 5A Charger : 4 Jam
	Pengisian Tegangan Cut Off	67,2 Volt
	Proteksi Tegangan Terhadap Pengisian Berlebih	4,2/Cell
Pengosongan	Pengosongan maksimum <i>continuous current</i>	50 A
	Arus Pengosongan Puncak	150 A
	Pengosongan Tegangan <i>Cut Off</i>	45 Volt
	Proteksi Tegangan Terhadap Pengosongan Berlebih	2.8 Volt/Cell
	Standar Pengisian	0 – 45° C

	Tabel 3.1 Lanjutan	
	Pengisian Cepat	10 – 45° C
Temperatur Kerja	Standar Pengosongan	–2 – 65° C
<i>Cycle Life</i>	800-1000 <i>Times</i>	
Dimensi	150*170*70mm	
Berat	5.5 Kg	
Aplikasi	<i>E-Bike, E-Motor Cycle, E-Scooter</i>	

Pada konverter ini kami menggunakan baterai Li-Ion 60 volt tipe 18650 dengan kapasitas 20 Ah. Baterai 60 volt ini hasil dari serangkaian seri paralel dari baterai Li 18650 2500mah 3.7 volt. Tabel 3.1 dibawah ini menunjukkan spesifikasi dari baterai yang digunakan pada penelitian kali ini.

Tabel 3.1 diatas menunjukan spesifikasi baterai yang kita pergunakan pada kendaraan listrik khususnya sepeda motor listrik pada umumnya. Tegangan nominal baterai yang kita pergunakan yaitu sebesar 60 volt dengan kapasitas 20 Ah. Jenis baterai ini kita sesuaikan dengan kondisi yang ada di lapangan. Pada tabel tersebut juga dijelaskan secara rinci mengenai model pengisian, waktu pengisian, pengisian tegangan cut off,dll. Temperatur kerja, *life cycle*, dimensi, berat juga dijelaskan secara rinci pada tabel spesifikasi baterai tersebut. Pada baterai 60 Volt 20 Ah ini pada implementasinya dipergunakan sebagai aplikasi *E-Bike, E-Motor*, maupun *E-Scooter*.

Untuk percobaan penelitian dc-dc forward konverter ini kami menyesuaikan dengan peralatan yang ada di laboratorium, yaitu menggunakan variabel *power supply* yang bisa diatur tegangannya dengan *range* antara 0 – 65 volt.

3.3 Desain Dc-Dc Forward Konverter Dua Saklar

Desain konverter bertujuan untuk menentukan parameter awal dari konverter dengan mempertimbangkan ketersediaan komponen-komponen yang ada di pasaran dan ketersediaan peralatan penunjang yang ada di laboratorium untuk memudahkan dalam implementasi. Penentuan parameter komponen akan membantu dalam mengetahui kapasitas dari komponen seperti kapasitas tegangan, arus, dan daya.

Tabel 3.2 Spesifikasi awal desain konverter

Parameter	Nilai
Pout	100 Watt
Vout	12,24 Volt
Vin	60 Volt
Frekuensi <i>Switching</i>	10 Khz
<i>Ripple</i> VC1	2,5%
<i>Ripple</i> IL1	25%
<i>Duty Cycle</i>	45%

Konverter didesain dengan kapasitas 100 Watt dengan pertimbangan kapasitas peralatan lampu pada sepeda motor listrik yang dibutuhkan. *Range* tegangan input ditentukan sebesar 50-60 volt, hal ini bertujuan untuk mengatasi terjadinya penurunan tegangan input baterai. Frekuensi *switching* sebesar 10 khz untuk memperkecil nilai induktor L1. *Ripple* Vc1 ditentukan sebesar 2.5% dengan pertimbangan ketersediaan nilai kapasitansi kapasitor yang ada di pasaran. *Ripple* IL1 ditentukan sebesar 20% untuk mengurangi nilai induktansi yang terlalu besar karena nilai induktansi yang semakin besar akan mempercepat saturasi pada inti induktor.

3.3.1 Penentuan Nilai Beban

Penentuan beban konverter mempertimbangkan keadaan ketika konverter terbebani secara maksimum, yaitu sebesar 100 Watt pada tegangan 12,24 volt. Berdasarkan persamaan (2.28) maka dapat ditentukan nilai resistor sebesar :

$$R_{out} = \frac{V^2}{P} = \frac{(12,24)^2}{100} = 1.5 \text{ Ohm}, \quad (3.1)$$

3.3.2 Penentuan Nilai Induktor L1

Nilai induktor dalam implementasi dihitung dengan menggunakan persamaan (2.26) dengan operasi mode CCM (*Curent Continuous Mode*). Nilai arus yang mengalir pada induktor harus lebih besar dari nol. Pada perhitungan ini, konverter dianggap ideal sehingga daya masukan bernilai sama dengan daya keluaran. Penentuan nilai induktor L1 adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{karena } \Delta i_{Lo} &< 6,4 \text{ A,} & L1 &> \left(1 - \frac{1}{VS} \cdot \frac{n1}{n2} \cdot Vo\right) \cdot \frac{1}{\Delta i_{L1}} \cdot Vo \cdot \frac{1}{fs}; \\ L1 &> \left(1 - \left(\frac{1}{60} \cdot 2,25 \cdot 12,24\right)\right) \cdot \frac{1}{2,08} \cdot 12,24 \cdot \frac{1}{10.000} \\ L1 &> (1 - 0,45) \cdot 72 \times 10^{-5} \\ L1 &> 396 \text{ uH, } L1 \approx 400 \text{ uH} \end{aligned} \quad (3.2)$$

- Jadi besarnya nilai induktor L1 yaitu sebesar 400 uH.

Untuk mendapatkan nilai induktansi L1 sebesar 400 uH maka dalam implementasinya digunakan kawat tembaga jenis AWG yang sudah dipilin untuk dililitkan ke bobbin.

3.3.3 Penentuan Nilai Kapasitor C1

Nilai kapasitor C1 dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.27). Desain *ripple* tegangan yang diinginkan adalah sebesar 2.5% dari tegangan pada kapasitor C1. Penentuan nilai kapasitor C1 adalah sebagai berikut :

$$C_1 = \left(V_o + \frac{\Delta V_o}{2}\right) \left(\frac{1 - D}{R_o \Delta V_o f}\right) \quad (3.3)$$

Oleh karena itu, besarnya nilai kapasitor filter C1 yaitu :

$$\begin{aligned} C1 &= \left(12 + \frac{2,5/100 \cdot 12}{2}\right) \left(\frac{1 - 0,45}{1,5 \cdot 2,5/100 \cdot 12 \cdot 10000}\right), \\ C1 &= 2200\mu\text{F} \end{aligned}$$

Karena nilai kapsitor sebesar 1500 uF maka kami mengambil nilai terdekat yang ada di pasaran yaitu sebesar 2200uF.

3.3.4 Penentuan Dioda D1 dan D2

Rangkaian Dc-Dc forward konverter dua saklar beroperasi pada tingkat pensaklaran yang tinggi, yaitu 10 Khz. Konverter ini menggunakan empat buah dioda, yitu dioda D1,D2,D3, dan D4. Pemilihan dioda harus memiliki spesifikasi yang baik dari segi arus,

tegangan, dan waktu *reverse recovery* yang cepat. Dua dioda D1 dan D2 yang berfungsi sebagai demagnetisasi memiliki nilai arus dan tegangan maksimum yaitu,

$$VD1 = VD2 = -VS \text{ maks} = -60 \text{ Volt} \quad (3.4)$$

Sesuai dengan persamaan (2.10) maka,

$$ID1 = ID2 = \Delta iL_{\text{mag}} = 0.406 \text{ A} \quad (3.5)$$

Dari pertimbangan tersebut, maka dipilih dioda jenis MUR 460. Dioda ini berjenis dioda *ultrafast switching* dengan rugi pensaklaran yang rendah. Tegangan *breakdown* pada dioda ini adalah (VR) 600 Volt dengan arus total maksimum yang dapat dilewatkan (If) hingga 4 A. Dioda MUR 460 juga memiliki *reverse recovery time* (trr) yang cepat yaitu 50 ns. Komponen dioda MUR 460 dapat dilihat pada gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3.2 Dioda MUR 460

3.3.5 Penentuan Dioda D3 dan D4

Dua dioda D3 dan D4 yang berfungsi sebagai penyearah memiliki nilai arus maksimum dan tegangan minimum yaitu,

$$VD3 \text{ min} = VD4 \text{ min} = -\frac{VS \text{ max}}{n} = -\frac{60 \text{ Volt}}{2,25} = -27 \text{ Volt} \quad (3.6)$$

dan

$$\begin{aligned} ID3 \text{ max} = ID4 \text{ max} &= I_o \text{ max} + \frac{\Delta iL_{\text{fmax}}}{2} \\ &= 8,16 + \frac{1,66}{2} = 9,1 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Oleh karena itu, arus puncak yang melewati belitan primer trafo yaitu :

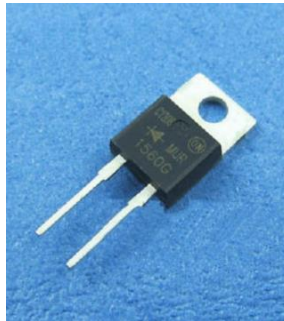
$$I_p \max = \frac{ID3 \max}{n} = \frac{9,14}{2,25} = 4,06 \text{ A} \quad (3.8)$$

Sedangkan arus puncak yang melewati induktansi magnetisasi L_{mag} diasumsikan sebesar 10% dari arus puncak pada belitan primer [3],

$$\Delta i_{L_{mag}} \max = 0.1 I_p \max = (0.1) \cdot (4,06) = 0.406 \text{ A} \quad (3.9)$$

$$L_{mag} = \frac{Dr. VS \max}{fs. \Delta i_{L_{mag}} \max} = \frac{0.45 \cdot 60 \text{ Volt}}{10\text{Khz} \cdot 0.4} = 6,75 \text{ mH} \quad (3.11)$$

Dari pertimbangan tersebut, maka dipilih dioda jenis MUR 1560. Dioda ini berjenis dioda *ultrafast switching* dengan rugi pensaklaran yang rendah. Tegangan *breakdown* pada dioda ini adalah (VR) 600 volt dengan arus total maksimum yang dapat dilewatkan (I_f) hingga 30 A. Dioda MUR 1560 juga memiliki *reverse recovery time* (t_{rr}) yang cepat yaitu 60 ns. Komponen dioda MUR 1560 dapat dilihat pada gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.3 Dioda MUR 1560

3.3.6 Penentuan Mosfet M1 dan M2

Rangkaian Dc-Dc forward konverter kami desain menggunakan dua buah saklar elektronik. Saklar elektronik tersebut menggunakan MOSFET. Perhitungan untuk menentukan besar tegangan maksimum pada MOSFET adalah sebagai berikut :

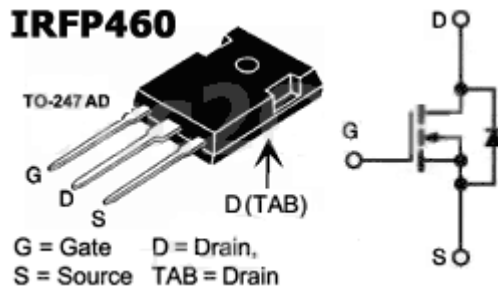
$$VM1 \max = VM2 \max = VS \max = 60 \text{ volt}$$

Sedangkan arus maksimum yang melewati MOSFET tersebut yaitu,

$$IM1maks = IM2 maks = \frac{Io maks}{n} + \Delta iLmag(maks) = \frac{8.3}{2,25} + 0.4$$

$$IM1 maks = IM2 maks = 4,08 A$$

Setelah mengetahui parameter tegangan dan arus maksimum pada MOSFET, Tipe MOSFET yang akan kita gunakan bisa kita tentukan. MOSFET yang digunakan ialah tipe IRFP460. MOSFET ini memiliki kemampuan menahan beda tegangan antara *drain* dan *source* atau VDS sebesar 500 Volt dengan arus *drain* sebesar 20 A. Tegangan yang diberikan pada gate dan source atau VGS maksimum sebesar 20 Volt. Besar hambatan Rds(ON) ketika bekerja adalah 0.27 ohm ketika VGS disuplai tegangan 10 Volt. Besar tegangan dan arus yang melewati MOSFET masih dibawah nilai spesifikasi yang diberikan oleh MOSFET IRFP460, sehingga mampu diaplikasikan pada konverter ini. MOSFET IRFP460 ditunjukkan pada gambar 3.5.



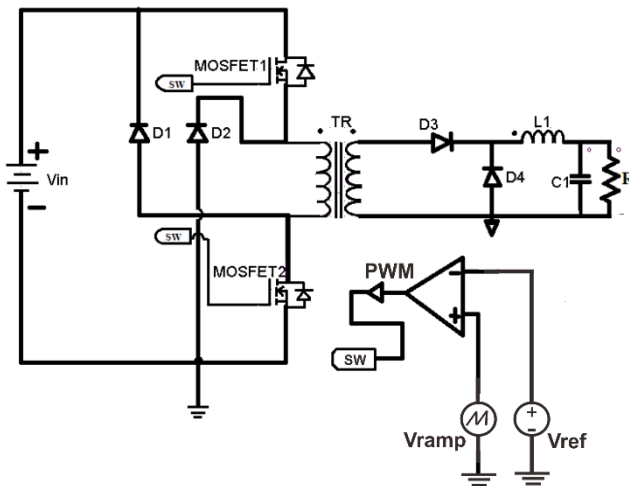
Gambar 3.4 MOSFET tipe IRFP460

Tabel 3.3 Parameter Komponen Berdasarkan Hasil Perhitungan

Parameter	Nilai
Dioda D1,D2	MUR 460
MOSFET M1,M2	IRFP 460
Dioda D3,D4	MUR 1560
Induktor L1	400 uH
Kapasitor C1	2200 uF
Rout	1.5 Ohm

3.4 Simulasi Rangkaian pada Kondisi Tunak

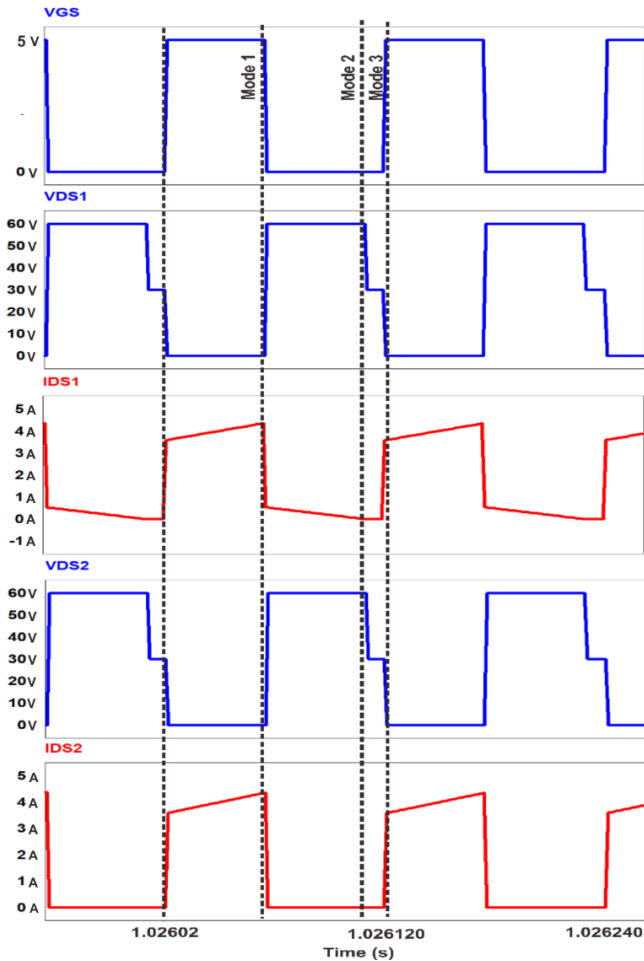
Simulasi rangkaian kondisi *steady state*/ tunak dilakukan dengan tujuan memastikan konverter dapat bekerja sesuai desain. Gambar 3.6 merupakan rangkaian simulasi dari konverter. Pada penelitian ini, simulasi konverter menggunakan *software* PSIM 8.0. Simulasi dilakukan pada saat kondisi *steady state* dan komponen-komponen sistem yang digunakan dalam simulasi merupakan komponen yang ideal.



Gambar 3.5 Rangkaian Simulasi Forward Konverter

Nilai parameter-parameter hasil desain yang digunakan pada tahap simulasi yaitu nilai tegangan *input*, frekuensi pensaklaran, *ripple* arus, *ripple* tegangan keluaran, rasio belitan trafo, nilai induktor L1, nilai kapasitor C1, dan nilai beban R yang diharapkan mampu menghasilkan tegangan keluaran sesuai dengan desain yang diinginkan. Tegangan masukan pada simulasi dibuat konstan sebesar 60 Volt dan tegangan keluaran sebesar 12 Volt. Daya masukan dan keluaran sebesar 100 Watt. Frekuensi pensaklaran yang digunakan ialah 10 KHz dengan *duty cycle* pada PWM sebesar 45 %. Rangkaian simulasi forward konverter ini bersifat *close loop*. Simulasi yang sifatnya *close loop* ini bertujuan untuk mengetahui respon kontrol dari *duty cycle* ketika

tegangan input berubah. Sistem kerja dari kontroler ini yaitu dengan melakukan *sensing* pada tegangan keluaran konverter untuk dibandingkan dengan tegangan referensi atau *set point* yang bernilai 12 volt.

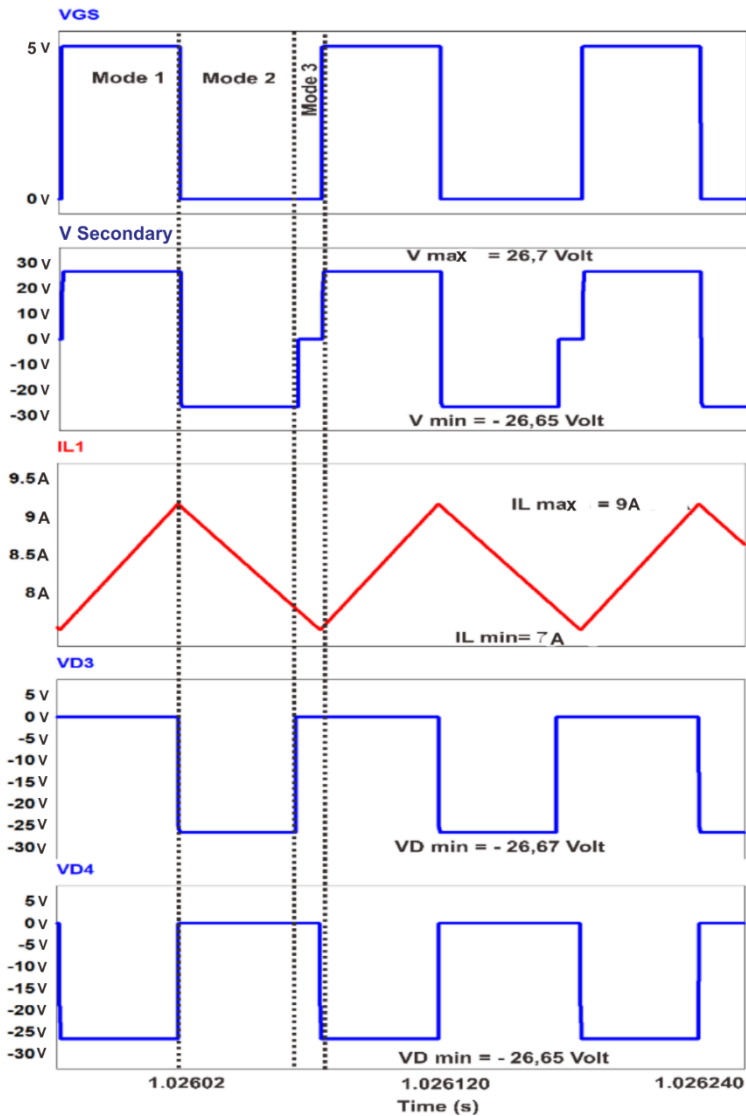


Gambar 3.6 Bentuk gelombang tegangan *Gate- Source*, Tegangan *Drain-Source*, dan Arus *Drain-Source* pada MOSFET 1 dan 2.

Pada gambar 3.6 diatas merupakan karakteristik bentuk gelombang tegangan pensaklaran pada sisi *gate-source* (VGS), tegangan *drain-source* (VDS1,VDS2), arus pada MOSFET M1,M2 (IDS1,IDS2). Susunan simulasi pada gambar 3.6 kami sesuaikan dengan karakteristik gelombang yang digambarkan pada gambar 2.4. Ketika *trigger* PWM diberikan pada sisi *gate* MOSFET maka mosfet tersebut berada pada mode konduksi (Ton). Hal ini terlihat pada grafik tegangan *gate-source*, yang mana menunjukkan ketika tegangan *gate-source* berlogika *high*, maka tegangan *drain-source* akan bernilai 0. Akibatnya, arus akan mengalir dari sisi *drain* menuju *source* seperti yang terlihat pada grafik Ids. Ketika mode konduksi, maka saklar akan membuka selama 55 μ s dan akan menutup selama 45 μ s. Pada simulasi ini, tegangan maksimal *drain-source* MOSFET bernilai 60 Volt, sedangkan arus maksimal pada *drain source* bernilai 4,1 A. Parameter yang didapatkan pada simulasi ini akan dijadikan parameter dalam menentukan jenis MOSFET yang digunakan saat implementasi agar koneverter tersebut bekerja secara optimal.

Gambar 3.7 dibawah ini merupakan gambar kaarakteristik bentuk gelombang tegangan pada sisi sekunder trafo, arus pada induktor sebagai filter, serta pengujian pada dioda D3 dan D4. Berdasarkan bentuk gelombang pada gambar 3.7, bentuk gelombang tersebut dapat dilakukan analisis pada rangkaian forward konverter pada saat saklar *on* dan *off*.

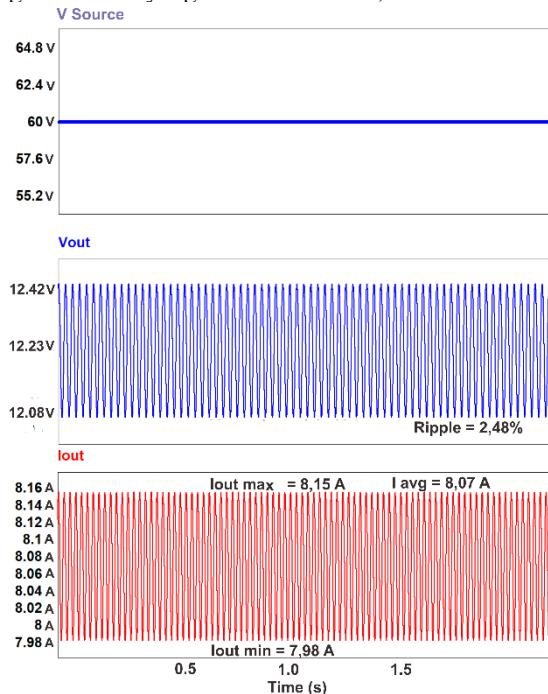
Pada saat saklar *on* maka gelombang VGS akan aktif, dioda D3 berada pada kondisi *on (forward)*, sedangkan dioda D4 berada pada kondisi *off (reverse)*. Pada kondisi ini, induktor L1 akan melakukan proses *charging* yang berasal dari sumber tegangan Dc baterai. Hal ini selaras dengan bentuk gelombang tegangan dan arus induktor L1 yang meningkat saat VGS aktif. Pada saat saklar *off* maka gelombang VGS akan mati atau bernilai nol, dioda D3 berada pada kondisi *off (reverse)*, sedangkan dioda D4 berada pada kondisi *on (reverse)*. Pada kondisi ini induktor L1 megalami *discharging* atau pengosongan muatan.



Gambar 3.7 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada induktor, dioda D3,D4, dan tegangan pada sisi sekunder trafo.

Dari data tersebut, nilai tegangan maksimum pada sisi sekunder trafo yaitu bernilai 26,7 volt dan tegangan minimumnya yaitu sekitar – 26,65 volt. Sedangkan pada induktor L1, nilai arus maks L1 yaitu 9 A dan arus min yaitu 7 A, sehingga besarnya ΔI_L yaitu 2 A atau besarnya *ripple* arus senilai 25%. Nilai ripple ini sesuai dengan perhitungan yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Tegangan pada dioda D3 dan D4 yaitu – 26,67 dan -26,65, hasil ini sesuai dengan perhitungan teori yang dipaparkan pada bab sebelumnya.

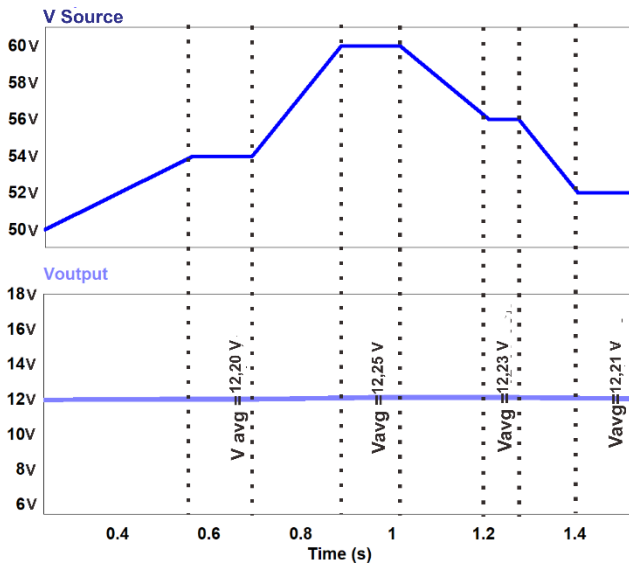
Gambar 3.8 menunjukkan bentuk gelombang dari tegangan masukan V_{in} , V_{out} , dan arus keluaran pada konverter. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa pada simulasi tegangan keluaran memiliki nilai sebesar 12 volt dari tegangan masukan 60 volt. Selain itu, *ripple* tegangan keluaran yang terukur senilai 2,48 %.



Gambar 3.8 Bentuk gelombang tegangan input (V_s), tegangan *output* (V_o), dan arus *output* (I_{out}).

3.5 Konverter pada Kondisi Dinamis (*close loop*)

Simulasi kondisi dinamis bertujuan untuk mengetahui respon kontrol dari *duty cycle* ketika tegangan input berubah. Sistem kerja dari kontroler ini yaitu dengan melakukan *sensing* pada tegangan keluaran konverter untuk dibandingkan dengan tegangan referensi atau *set point* yang bernilai 12 volt. Selisih antara tegangan referensi dan hasil sensing tegangan keluaran akan dianggap sebagai *error* yang kemudian akan diolah oleh IC At mega 328p untuk mengatur lebar *duty cycle* sehingga tegangan keluaran akan mendekati tegangan referensi. gambar 3.9 dibawah ini menunjukkan simulasi dari konverter dalam kondisi dinamis saat konverter tersebut berada pada kondisi *close loop* (dengan menggunakan kontrolller).



Gambar 3.9 Simulasi kondisi dinamis saat konverter beroperasi secara *close loop*.

Gambar 3.9 merupakan simulasi kondisi dinamis ketika konverter beroperasi secara *close loop* (menggunakan kontrolller). Pada simulasi ini kami memberikan variasi sumber tegangan input dengan rentang 50 – 60 volt. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konverter mampu mempertahankan tegangan keluarannya konstan 12 volt pada

range 12,20 - 12,25 volt ketika konverter diberi sumber tegangan dengan *range* 50 – 60 volt.

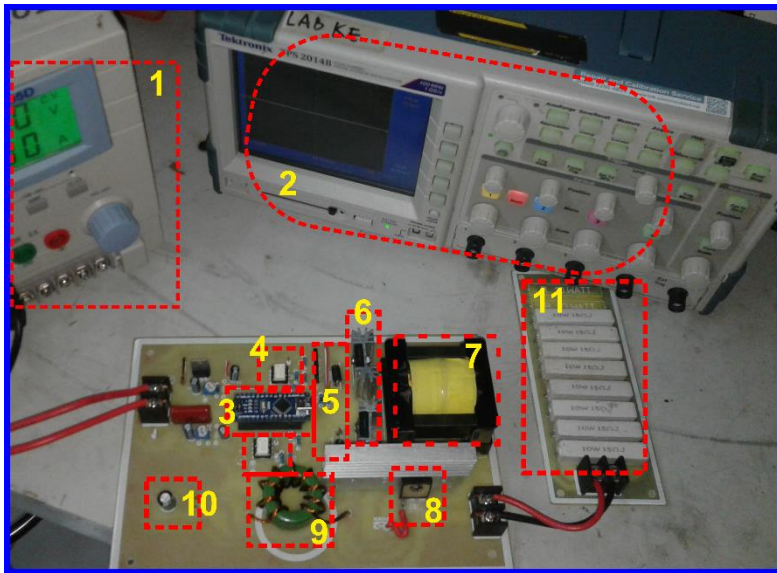
3.6 Implementasi

Implementasi merupakan tahap pembuatan alat sesuai desain yang telah ditentukan. Implementasi dilakukan untuk mengetahui kinerja konverter DC-DC forward konverter dengan dua saklar. Tabel 3.4 menunjukkan nilai komponen implementasi pada konverter.

Tabel 3.4 Parameter Komponen Implementasi Forward Konverter

Komponen	Nilai
Tegangan Sumber Baterai	60 Volt 20 Ah
Tegangan Sumber DC <i>Power Supply</i>	60 Volt
PWM controller	At Mega 328p Nano
MOSFET	IRFP 460
Optocoupler	TLP 250
Regulator 12 volt	LM 2678
Dioda (D1,D2)	MUR460
Dioda (D3,D4)	MUR 1560
Inti Trafo	ETD 49
Inti Induktor	T68-2 inti hijau
Induktor L1	400 uH
Kapasitor C1	Polar 2200 uF /50 V
Frekuensi Pensaklaran	10.000 Hz
<i>Duty Cycle</i>	45%
Tegangan Keluaran	12 Volt
Beban Resistor	100 Watt, 1.5 Ohm

Nilai komponen ketika proses implementasi disesuaikan dengan ketersediaan komponen yang ada di pasaran. Nilai pada komponen implementasi merupakan nilai dengan *rating* yang lebih tinggi dari nilai komponen yang telah didesain untuk mengantisipasi fenomena yang tidak diinginkan ketika proses pembuatan alat/implementasi. Komponen yang sudah dirangkai dapat dilihat pada gambar 3.12 dibawah ini.



Gambar 3.10 Implementasi Dc-Dc Forward Konverter

Keterangan :

- | | |
|------------------------------------|---------------------|
| 1. Power supplai 60 volt, 5 ampere | 6. Mosfet M1,M2 |
| 2. Oscilloscope | 7. Trafo inti ferit |
| 3. PWM kontrollor IC At mega 328p | 8. Dioda D3,D4 |
| 4. Driver Mosfet | 9. Induktor L1 |
| 5. Dioda D1,D2 | 10. Kapasitor C1 |
| 11. Beban resistor 100 Watt | |

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian dan analisis dari implementasi Dc-Dc forward konverter dua saklar. Pengujian yang dilakukan antara lain adalah pengujian pensaklaran, pengujian dioda, pengujian induktor, pengujian tegangan masukan dan keluaran, pengujian rasio konversi, pengujian efisiensi, dan pengujian respon dinamik konverter.

4.1 Alat Pengujian

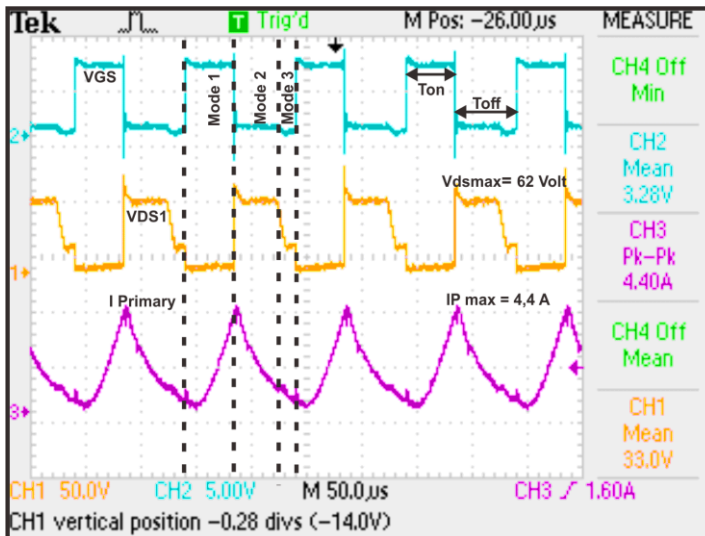
Pengujian konverter Dc-Dc forward konverter dua saklar menggunakan beberapa peralatan yang ada di laboratorium. Peralatan tersebut meliputi sumber DC variabel, osiloskop, multimeter, LCR meter, dan beban lampu. Sumber DC variabel memiliki tegangan maksimal sebesar 63 volt dan arus maksimal sebesar 5 A ketika dihubungkan secara seri. Namun, dalam implementasi hanya digunakan tegangan sebesar 60 volt.

4.2 Pengujian Sinyal dan Nilai Komponen

Pengujian sinyal dan nilai komponen bertujuan untuk membandingkan apakah sinyal pada proses implementasi telah sesuai dengan sinyal ketika proses perancangan dan juga membandingkan antara nilai tegangan dan arus pada komponen ketika perancangan dan implementasi. Pengujian ini terdiri dari pengujian pensaklaran, pengujian induktor, pengujian dioda, tegangan sekunder trafo, dan pengujian tegangan masukan dan keluaran.

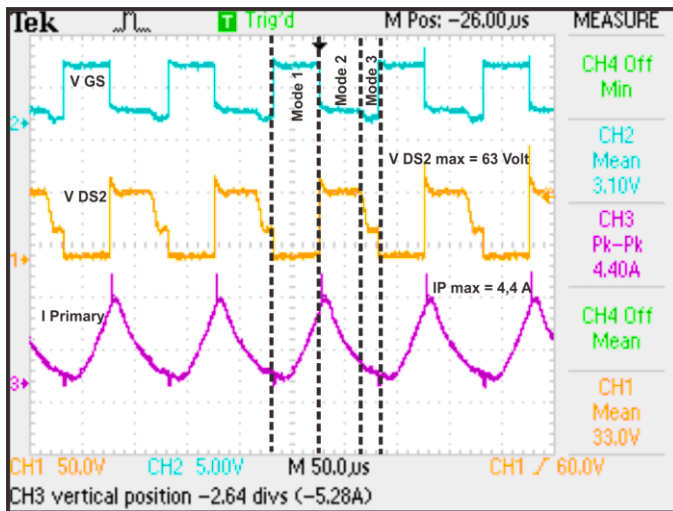
4.2.1 Pengujian Pensaklaran

Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan bentuk sinyal tegangan *gate-source*, tegangan *drain-source*, dan arus pada primer trafo. Bentuk gelombang pada gambar tersebut telah sesuai dengan perancangan dan simulasi. Pada gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan tegangan pada PWM, VDS, dan arus primer trafo.



Gambar 4.1 Bentuk Sinyal Pensaklaran MOSFET 1

Ketika sisi *gate* diberi tegangan *trigger* berupa PWM sesuai yang ada pada gelombang tegangan *gate-source*, maka sakelar akan menutup atau Ton. Pada mode ini, tegangan *drain-source* akan bernilai nol, sehingga menyebabkan adanya arus mengalir dari sisi *drain* menuju sisi *source* pada MOSFET. Arus maksimum yang mengalir pada belitan trafo bernilai 4,4 Ampere. Arus ini sudah mendekati nilai perhitungan yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Ketika saklar membuka, maka tegangan *drain-source* bernilai maksimal, yaitu 62 volt. Tegangan *drain-source* ketika implementasi lebih tinggi dibandingkan ketika desain karena adanya ketidakidealan komponen, terutama akibat adanya Rds (tahanan di antara sisi *drain* dan *source*). Gambar diatas juga menunjukan ketiga mode(mode1, mode2, mode3) yang sama ditunjukkan pada saat simulasi. Mode 3 diatas merupakan mode peralihan antara mode pengosongan dan mode pengisian. Pada pengujian diatas kami menggunakan frekuensi pensaklaran sebesar 10Khz.



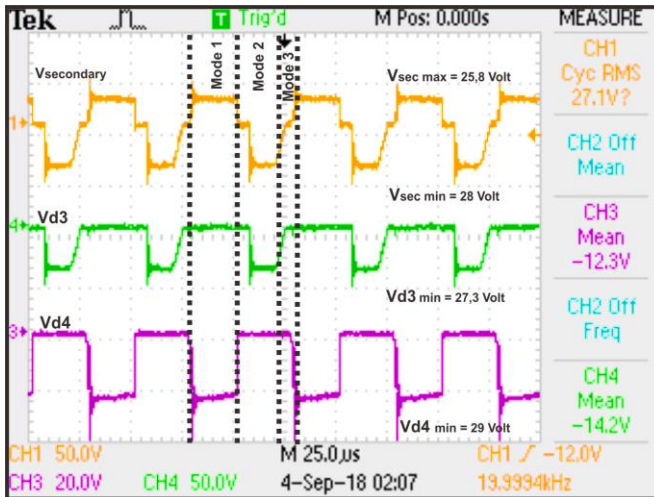
Gambar 4.2 Bentuk Sinyal Pensaklaran MOSFET 2

Gambar 4.2 diatas merupakan bentuk sinyal yang dihasilkan pada pensaklaran MOSFET2, MOSFET1 dan MOSFET2 bekerja secara *parallel operation*, sehingga sinyal yang dihasilkan relatif sama. Pada mode ini, tegangan *drain-source* akan bernilai nol, sehingga menyebabkan adanya arus mengalir dari sisi *drain* menuju sisi *source* pada MOSFET. Arus maksimum pada belitan trafo bernilai 4,4 Ampere. Arus ini sediki berbeda dengan simulasi, hal ini dikarenakan adanya ketidakidealan komponen yang ada di pasaran yang menyebabkan rugi rugi. Ketika saklar membuka, maka tegangan *drain-source* bernilai maksimal, yaitu 63 volt. Tegangan *drain-source* ketika implementasi lebih tinggi dibandingkan ketika desain karena adanya ketidakidealan komponen, terutama akibat adanya R_{ds} (tahanan di antara sisi *drain* dan *source*). Pada pengujian diatas kami menggunakan frekuensi pensaklaran sebesar 10Khz dengan *duty cycle* sebesar 45%.

4.2.2 Pengujian Tegangan Sekunder Trafo dan Dioda D3,D4.

Pengujian tegangan sekunder trafo, dioda D3, dan D4 bertujuan untuk memastikan bahwa proses pensaklaran pada dc-dc forward

konverter berlangsung dengan baik sehingga mode Ton dan mode Toff dapat bejalan maksimal. Hasil pengujian ini terdapat pada gambar 4.3.

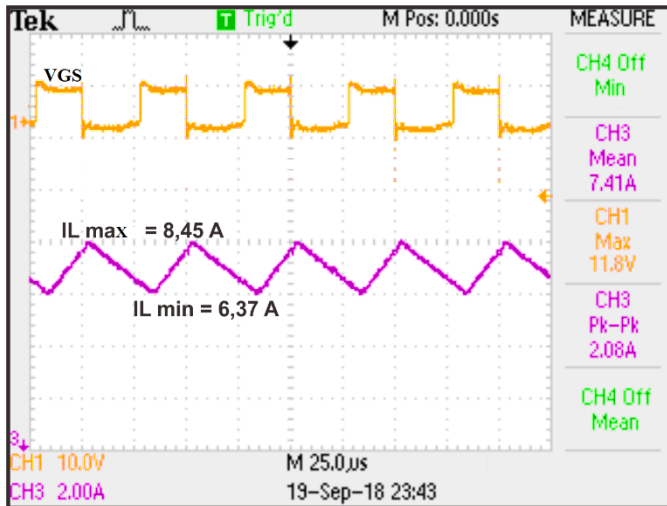


Gambar 4.3 Hasil Pengujian Tegangan Sekunder, Dioda 3, dan Dioda 4.

Dari hasil pengujian tersebut dapat dilihat bahwa karakteristik bentuk gelombang pada sekunder trafo, dioda D3, dan D4 hasil implementasi sudah sesuai dengan karakteristik dari hasil perancangan dan simulasi. Ketika saklar tertutup maka ada arus yang mengalir dari sisi anoda ke katoda pada dioda D3, sehingga tegangan pada D3 bernilai nol. Sedangkan pada dioda D4 tidak ada arus yang mengalir, sehingga muncul tegangan pada dioda D4. Dari hasil implementasi, nilai tegangan minimal dioda D3 dan D4 yaitu sebesar -27,3 volt dan -29 volt. Nilai ini sedikit berbeda dengan simulasi yaitu sekitar 26,7 volt. Hal ini menunjukkan bahwa hasil implementasi sudah mendekati dari hasil yang didesain.

4.2.3 Pengujian Arus Induktor L1

Pengujian arus induktor L1 bertujuan untuk membandingkan hasil desain dan simulasi dengan hasil pada implementasi, terutama dalam hal bentuk gelombang, nilai arus, serta nilai *ripple*. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.4.



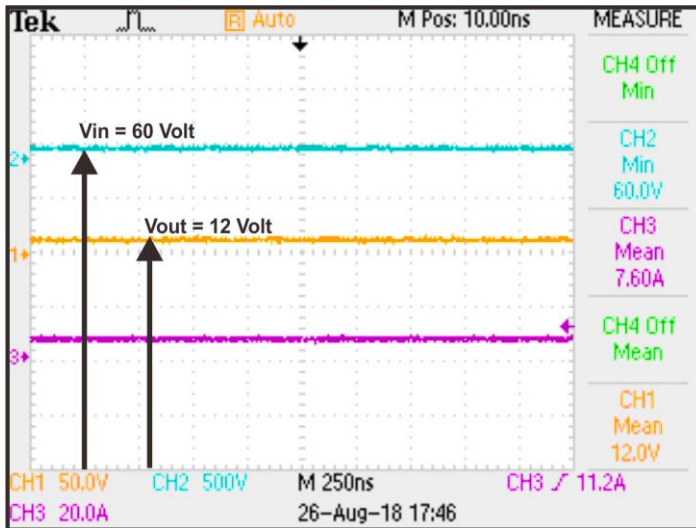
Gambar 4.4 Pengujian Arus Pada Induktor L1.

Pada gambar tersebut, terlihat bentuk gelombang arus pada induktor L1, dapat dilihat bahwa bentuk gelombang tersebut telah sesuai dengan desain dan simulasi dengan menunjukkan hasil arus rata rata sebesar 7,41 A dengan besar *ripple arus* sebesar 2,08 A. Hasil ini sedikit memiliki perbedaan dengan hasil simulasi, hal ini dikarenakan komponen yang ada memiliki rugi rugi sehingga memiliki hasil yang sedikit berbeda dengan hasil pada simulasi. Proses *charging* induktor L1 terjadi ketika saklar berada pada kondisi tertutup, sedangkan proses *discharging* L1 terjadi pada saat saklar berada kondisi terbuka.

4.2.4 Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran

Pengujian tegangan masukan dan keluaran bertujuan untuk mengetahui bentuk sinyal dan nilai dari tegangan keluaran dibandingkan dengan hasil desain dan simulasi. Hasil dari pengujian ini terdapat pada gambar 4.5.

Dari pengujian ini, dapat dilihat bahwa tegangan keluaran rata rata bernilai 12 volt dimana memiliki *ripple* tegangan sebesar 0,4 volt dimana masih sesuai standar *ripple* yang direkomendasikan, sedangkan untuk arus keluaran rata rata yaitu senilai 7,60 ampere. Hasil ini sudah mendekati hasil yang didesain, hal ini membuktikan bahwa konverter mampu bekerja secara baik.



Gambar 4.5 Bentuk Sinyal Tegangan Masukan dan Keluaran

4.3 Pengujian Efisiensi

Pengujian efisiensi bertujuan untuk mengetahui efisiensi konverter pada daya keluaran yang berbeda beda. Pengujian efisiensi konverter dilakukan dengan memberikan tegangan yang konstan, yaitu sebesar 60 volt. Tegangan keluaran diatur hingga mencapai 12 volt. Setelah itu, tegangan keluaran dijaga konstan pada setiap nilai beban tertentu. Pengujian efisiensi diatur mulai dari beban 40 Watt hingga 100 Watt. Untuk mengukur efisiensi, maka dilakukan dengan cara membandingkan antara daya keluaran dengan daya masukan dari konverter. Tabel 4.1 dibawah ini menunjukkan hasil pengujian konverter ketika pembebanan pada konverter tersebut diubah ubah dari beban 40 watt sampai beban 100 watt. Pada simulasi, efisiensi maksimum terjadi pada keadaan *rating* yaitu pada beban 100 watt, sedangkan pada implementasi efisiensi maksimum terjadi ketika pembebanan 80 % dari kondisi *rating*.

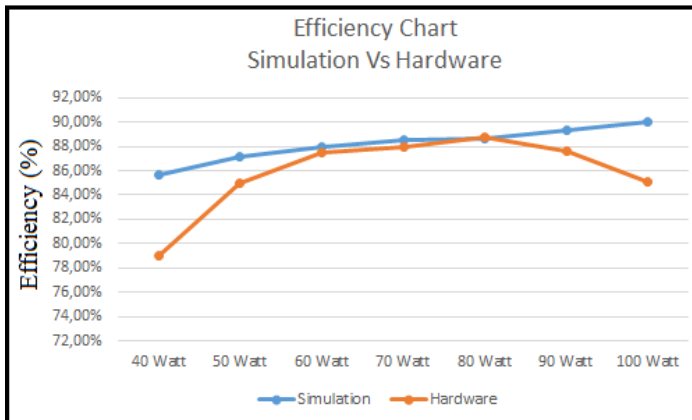
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Simulasi Konverter pada *range* beban 40 – 100 Watt

Vin (V)	Iin(A)	Vout(V)	Iout(A)	R beban (40-100W)	η (%)
60 Volt	0,74	12,05	3,21	3,75 Ohm	85,7 %
60 Volt	0,93	12,04	4,01	3,00 Ohm	87,1 %
60 Volt	1,10	12,03	4,81	2,50 Ohm	87,9 %
60 Volt	1,27	12,02	5,62	2,14 Ohm	88,5 %
60 Volt	1,45	12,02	6,42	1,87 Ohm	88,7 %
60 Volt	1,61	12,01	7,19	1,67 Ohm	89,3 %
60 Volt	1,78	12,00	8,00	1,50 Ohm	90,0 %

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Implementasi Konverter pada *range* beban 40 – 100 Watt

Vin (V)	Iin(A)	Vout(V)	Iout(A)	DC(%)	Rbeban (Ohm)	η (%)
60 Volt	0,81	12,09	3,20	38%	3,75	79,0
60 Volt	0,92	12,01	4,03	40%	3,00	85,0
60 Volt	1,09	12,02	4,94	41%	2,50	87,5
60 Volt	1,30	12,04	5,70	42%	2,14	88,0
60 Volt	1,44	11,90	6,45	43%	1,87	88,8
60 Volt	1,66	11,86	7,54	45%	1,67	87,6
60 Volt	1,70	11,66	7,60	45%	1,50	85,1

Tabel 4.1 dan 4.2 diatas merupakan hasil pengujian simulasi dan implementasi pada konverter, dari kedua hasil tersebut maka akan diplot berbentuk grafik yang diperlihatkan pada gambar 4.6. Pada gambar 4.6 menunjukkan hasil grafik efisiensi pada simulasi dan implementasi. Hal ini bertujuan untuk menguji seberapa besar performa dari konverter yang sudah didesain serta membandingkan apakah hasil implementasi sesuai dengan simulasi yang sudah dibuat.



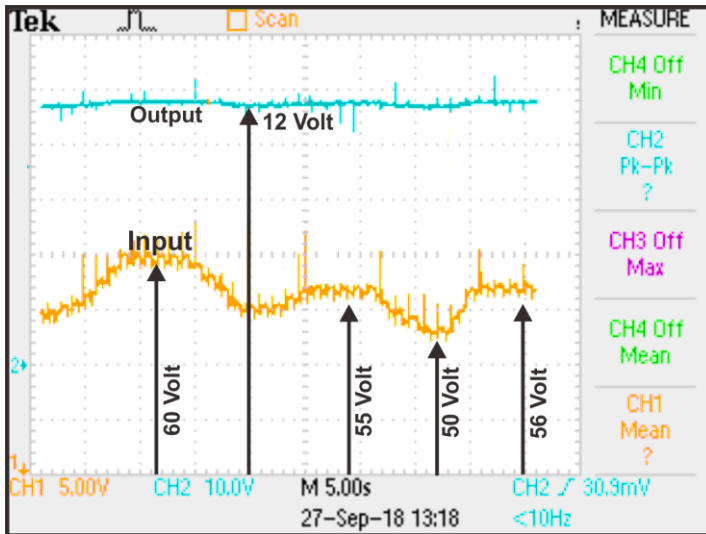
Gambar 4.6 Gambar grafik efisiensi konverter pada beban antara 40-100 Watt.

Dari gambar 4.6 dapat dilihat bahwa konverter dapat bekerja optimal pada daya kisaran 40 hingga 100 watt. Efisiensi konverter mengalami penurunan ketika dibebani dengan daya yang lebih besar. Hal ini disebabkan ketika daya yang mengalir semakin besar, maka arus yang mengalir juga semakin besar pula. Efisiensi pada konverter ini dapat ditingkatkan dengan memperhatikan manajemen panas pada setiap komponen terutama pada komponen semikonduktor karena rawan dengan rugi daya. Selain itu, pemilihan jenis komponen yang berkualitas tinggi dengan *parasitic component* yang tidak terlalu besar juga dapat meningkatkan efisiensi konverter. Secara keseluruhan, efisiensi rata-rata dari konverter adalah 87%.

4.4 Pengujian Respon Dinamik Konverter

Pengujian dalam kondisi dinamis bertujuan untuk mengetahui apakah respon kerja dari kontrol *duty cycle* untuk membuat tegangan keluaran V_{out} konstan sudah berfungsi sesuai dengan perancangan. Metode yang dilakukan saat pengujian pada kondisi dinamis ini yaitu pengujian respon kontrol *duty cycle* akibat perubahan tegangan masukan. Semakin besar tegangan masukan, maka akan semakin meningkat tegangan keluaran konverter. Begitu juga sebaliknya,

semakin kecil tegangan masukan maka akan menyebabkan penurunan tegangan keluaran pada konverter. Karena itu, kontrol *duty cycle* harus mampu merespon dengan cepat perubahan tegangan masukan sehingga dapat tetap menjaga tegangan keluaran V_{out} pada konverter secara konstan. Gambar 4.7 menunjukkan hasil pengujian respon *duty cycle* akibat perubahan tegangan masukan.



Gambar 4.7 Bentuk Sinyal Respon Dinamis Konverter

Perubahan tegangan masukan seperti pada gambar 4.7 menyebabkan respon *duty cycle* bekerja. Respon *duty cycle* sudah bekerja dengan baik. Hal tersebut terbukti dari hasil gelombang pada gambar 4.7. Ketika tegangan input berubah-ubah maka tegangan keluaran dari konverter tetap terjaga konstan yaitu 12 volt. Dapat disimpulkan bahwa konverter mampu mempertahankan tegangan keluaran meskipun tegangan masukan berubah-ubah.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan melalui simulasi dan implementasi dc-dc forward konverter dengan dua saklar dapat disimpulkan menjadi beberapa hal berikut :

1. Implementasi dc-dc forward konverter dua saklar mampu menurunkan tegangan dari 60 volt menjadi 12 volt secara *isolated*.
2. Pada implementasi, efisiensi maksimum terjadi pada saat 80% dari beban rating yaitu sebesar 88,8%, sedangkan pada simulasi efisiensi maksimum terjadi pada beban rating yaitu sebesar 90%.
3. Pada sistem kerja dinamis konverter, tegangan keluaran mampu mempertahankan tegangan sebesar 12 volt ketika tegangan masukan berubah ubah dari 50 V menuju 60 V dan turun menuju 52 V.

4.5 Saran

Adapun saran pada penelitian ini yang dapat diberikan sebagai referensi untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah :

1. Memilih komponen dengan spesifikasi lebih baik yang mampu dioperasikan pada tegangan dan frekuensi tinggi sehingga efisiensi dapat ditingkatkan.
2. Menggunakan metode SMD (Surface Mount Device) dalam penyusunan komponennya sehingga ukuran fisik pada konverter dapat diperkecil.
3. Pembelian pada trafo diperlukan penggunaan kawat konduktor yang memiliki resistansi sangat rendah.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR PUSTAKA

1. Wu, H. and Y. Xing, "*Families of Forward Converters Suitable for Wide Input Voltage Range Applications*,". *IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS*, 2014. **Vol 29, No 11**: p. 6006-6017.
2. Jeon , S.-J., "*A zero-voltage and zero -current switching full bridge DC-DC converter with transformer isolation*". *IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS*, 2001. **16**: p. 573-580.
3. Kazimierczuk, M.K., *Pulse Width Modulated DC-DC Power Converters*. 2nd Edition ed. 2015 Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
4. C.Basso, *Switch Mode Power Supplies*. Spice Simulation and Practical Design 2008: McGraw Hill.
5. Ki-Bum Park, G.-W.M., Myung-Joong Youn, " *Two Switch Active-Clamp Forward Converter With One Clamp Diode and Delayed Turnoff Gate Signal*,". *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2011. **Vol.58**: p. 4768-4772.
6. R.GULES, "*A Modified SEPIC Converter With High Static Gain*,". *IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS*, 2014. **vol.29, no.11**: p. 5860-5871.
7. Kazimierczuk, D.M.B.a.M.K., " *Two-switch flyback PWM DC-DC converter in continuous conduction mode*", . *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2010.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

LAMPIRAN

1. Tabel Kawat Tembaga AWG

AWG	Diameter (mm)	Luas Area (mm ²)	Arus (A)
1	7,350	42,4000	119
2	6,540	33,6000	94
3	5,190	21,2000	75
4	5,190	21,2000	60
5	4,620	16,8000	47
6	4,110	13,3000	37
7	3,670	10,6000	30
8	3,260	8,3500	24
9	2,910	6,6200	19
10	2,590	5,2700	15
11	2,300	4,1500	12
12	2,050	3,3100	9,3
13	1,830	2,6300	7,4
14	1,630	2,6300	5,9
15	1,450	1,650	4,7
16	1,290	1,3100	3,7
17	1,150	1,0400	2,9
18	1,024	0,8230	2,3
19	0,912	0,6530	1,8
20	0,812	0,5190	1,5
21	0,723	0,4120	1,2
22	0,644	0,3250	0,92
23	0,573	0,2590	0,729
24	0,511	0,4120	0,577
25	0,455	0,1630	0,457
26	0,405	0,1280	0,361
27	0,361	0,1020	0,288
28	0,321	0,0804	0,226
29	0,286	0,0646	0,182
30	0,255	0,0503	0,142

2. Listing Program

```

Int pwmPin = 9;
Int dutyPin = A1;
Int f      = 10.000;

Void setup() {
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

```

```

//Manual Mode
//PWM output menggunakan register
TCCR1A = _BV(COM1A1);
TCCR1B = _BV(WGM13)|_BV (CS10);

//Duty Cycle Maksimal
ICR1= 360; // f = 10.000 Hz//16000000/(2*f);
//Variable Duty Cycle
DutyVar= (analogRead(dutypin)- 1023)*-1;

//Batas Duty Cycle
DutyLimit = 0.5 * dutyVar;
If (dutyVar > dutyLimit)dutyVar= dutyLimit;
OCR1A = (dutyVar/1023)*ICR1;
dutyPercent = (dutyVar/1023)*100;
#include <PID_v1.h>
Double Setpoint, Input, Output;
Double Kp=0.02, Ki=0.8, Kd=0;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp,Ki, Kd,
DIRECT);

Void setup() {
    // put your setup code here, to run once :
    PinMode(9,OUTPUT);
    PinMode9A1,INPUT);
    Serial.begin(9600);
    TCCR1A= _BV(COM1A1);
    TCCR1B= _BV(WGM13)|_BV(CS10);
    ICR1=267;
    OCR1A=207;
    Serial.begin(9600);
    Input = analogRead(A1);
    Setpoint=562;
    MyPID.SetMode(AUTOMATIC);
    MyPID.SetOutputLimits(70,213);
}

```


BIOGRAFI PENULIS



Mohammad Rizky Ferdiansyah lahir di Banyuwangi pada tanggal 23 September 1995. Penulis akrab dipanggil Rizky dan selama hidupnya penulis dibesarkan di kota pendidikan, Kota Malang. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dan mulai menempuh pendidikan di perguruan tinggi Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Elektro pada tahun 2014. Kegemaran penulis yaitu membaca dan bermain sepak bola. Selain itu, penulis juga gemar merangkai rangkaian elektronika. Selama kuliah, penulis aktif mengikuti berbagai organisasi serta kompetisi ilmiah baik tingkat institut atau nasional. Organisasi yang pernah ia ikuti yaitu UKM technopreneur ITS, Workshop Himatektro, dan Rumah Kepemimpinan. Salah satu penghargaan yang telah ia raih yaitu menjadi salah satu nominator pada acara LIKE (*Learning Innovation, Knowledge, and Exhibition*) yang diadakan oleh PT.PLN pada tahun 2017 lalu.

---Halaman ini sengaja dikosongkan

